

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LETÍCIA GARCIA CREVELIN

**COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE LIMITE DE LIQUIDEZ
OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE CASAGRANDE E CONE PARA
DIFERENTES SOLOS ARGILOSOS**

Vitória-ES
2018

LETÍCIA GARCIA CREVELIN

**COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE LIMITE DE LIQUIDEZ
OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE CASAGRANDE E CONE PARA
DIFERENTES SOLOS ARGILOSOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Geotecnia.

Orientadora: Prof^a Kátia Vanessa Bicalho, PhD

Vitória-ES
2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Setorial Tecnológica,
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

- C926c Crevelin, Letícia Garcia, 1987-
Comparação entre os valores de limite de liquidez obtidos
pelos métodos de Casagrande e cone para diferentes solos
argilosos / Letícia Garcia Crevelin. – 2018.
157 f. : il.
- Orientador: Kátia Vanessa Bicalho.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.
1. Solos – Umidade. 2. Argila – Plasticidade. 3. Correlação
(Estatística). 4. Limite de liquidez (LL). 5. Cone de penetração.
6. Concha de Casagrande. I. Bicalho, Kátia Vanessa. II.
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.
Título.

CDU: 624

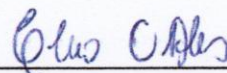
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

COMPARAÇÃO ENTRE OS VALORES DE LIMITE DE LIQUIDEZ OBTIDOS PELOS MÉTODOS DE CASAGRANDE E CONE PARA DIFERENTES SOLOS ARGILOSOS

Letícia García Crevelin

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de Estruturas.

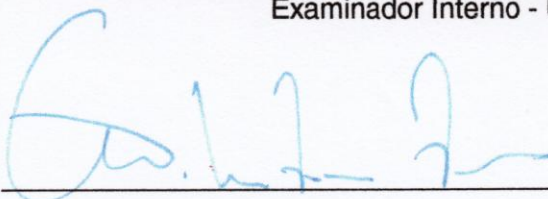
Aprovada no dia **28 de maio de 2018** por:



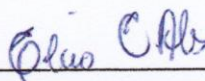
Prof. Dra. Kátia Vanessa Bicalho
Doutora em Engenharia Civil
Orientadora – UFES
Por meio de video conferência



Prof. Dr. Elcio Cassimiro Alves
Doutor em Engenharia e Tecnologias Espaciais
Examinador Interno - UFES



Prof. Dr. Antônio Manoel Ferreira Frasson
Doutor em Engenharia Elétrica
Examinador Externo - UFES



Prof. Dr. Waldyr Lopes de Oliveira Filho
Doutor em Engenharia Civil
Examinador Externo – UFOP
Por meio de video conferência

*“A persistência é o menor caminho do êxito”.
(Charles Chaplin)*

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e por ser meu amparo e fortaleza em todos os momentos.

À Instituição Universidade Federal do Espírito Santo, por me proporcionar momentos de aprendizado e amizades desde a graduação.

À professora Dra. Katia Vanessa Bicalho pela orientação, paciência e conhecimento essenciais para o desenvolvimento desta dissertação. Obrigada pela confiança que depositou em meu trabalho e pela compreensão diante das dificuldades de se conciliar a vida acadêmica com o mercado de trabalho.

Aos professores Waldyr, Élcio e Frasson, que prontamente aceitaram o convite de fazer parte da Banca Examinadora desta dissertação. Ao professor Adelmo Inácio Bertolde que sanou minhas dúvidas de estatística com muita atenção.

Ao meu esposo, Rodrigo, pela paciência, amor, incentivo e compreensão nos momentos de minhas ausências nessa jornada de estudos.

Ao meu pai, por sempre me apoiar e não medir esforços para que eu realizasse meus estudos, mesmo nos momentos difíceis. À minha mãe, pelo amor e por sempre se orgulhar de mim. À minha irmã, Tati, pelos conselhos e por ser um exemplo para mim. Ao meu irmão, Dani, pela amizade. A todos os meus familiares, tios e primos que sempre me incentivaram, em especial à minha madrinha, Terezinha.

Aos colegas de trabalho do Departamento de Estradas de Rodagem do Espírito Santo, pelo convívio diário, apoio e conhecimentos compartilhados.

Aos meus amigos que compreenderam a falta de tempo e a minha ausência em muitos momentos.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização de mais essa etapa de minha formação acadêmica.

RESUMO

No presente trabalho destaca-se a importância de especificar o procedimento e equipamento utilizado para determinar o limite de liquidez, LL, de um solo argiloso. Foram comparados os resultados de LL determinados pelo método de percussão proposto por Casagrande, LL_c , e pelo método do cone de penetração, LL_p , medidos por diferentes operadores e em diferentes laboratórios em solos argilosos de distintas mineralogias e origens geológicas. Os LL_p foram determinados de acordo com a norma britânica (penetração de 20 mm) e os valores de LL_c foram determinados utilizando aparelho de Casagrande de diferentes durezas. Foram avaliados oito grupos de pares de dados de LL_c e LL_p , agrupados em função da dureza da base do aparelho de percussão, mineralogia e valor de LL dos solos argilosos. Através da regressão linear simples os resultados experimentais mostram que as correlações entre os dois métodos variam com a mineralogia do solo argiloso e a dureza da base do aparelho à percussão. Os resultados de limite de liquidez obtidos para as caulinitas e ilitas ou solos com baixo LL indicaram $LL_p > LL_c$. Os valores de LL das montmorilonitas ou solos com alto valor de LL indicaram maior dispersão nas correlações entre os dois métodos e $LL_p < LL_c$. Os testes estatísticos dos resíduos mostraram que, apesar dos elevados valores dos coeficientes de determinação obtidos, algumas correlações lineares definidas neste trabalho não são válidas ou devem ser utilizadas com cautela. As correlações foram válidas para as montmorilonitas (para teor de argila maior que 30%) e para os solos argilosos de diversas mineralogias com LL entre 20 e 80%, sendo esta apenas para aparelho de percussão de base dura. Ressalta-se que este estudo busca estimular a avaliação crítica das correlações previamente publicadas e das que futuramente serão elaboradas, e não esgotar o assunto acerca da obtenção de correlações entre ensaios geotécnicos.

Palavras-chave: Limite de liquidez, plasticidade das argilas, cone de penetração, concha de Casagrande, correlações.

ABSTRACT

In this present study, is highlighted the importance of specifying the procedure and equipment used to determine the liquid limit (LL) of a clay soil. The results of LL, obtained by percussion method proposed by Casagrande (LL_c) and by the cone penetration method (LL_p), measured by different operators and at different laboratories of clayey soils from different mineralogies and geological origins were compared. The LL_p values were determined using British cone (20 mm fall cone penetration) and LL_c values were determined using different hardnesses of Casagrande apparatus. Eight data base groups of LL_c and LL_p were evaluated, grouped according to the hardness of the percussion apparatus, mineralogy and LL value of the clayey soils. The experimental results using simple linear regression shows that the correlations between the two methods vary with the mineralogy of the clayey soil and the hardness of the base of the apparatus to the percussion. The liquid limit results obtained for kaolinites and illites or low LL soils indicated $LL_p > LL_c$. The LL results of montmorillonites or soils with high LL value showed that there is greater dispersion among the correlations between both methods and that $LL_p < LL_c$. Residual statistical tests showed that, despite the high values of determination coefficients obtained, some linear correlations defined in this study are not valid or should be used with caution. The correlations were valid for montmorillonites (for clay content higher than 30%) and for clayey soils of several mineralogies with LL between 20-80% (this only for hard base percussion apparatus). It should be emphasized that this study seeks to stimulate the critical evaluation of the previously published correlations and those that will be elaborated in the future, and not to exhaust the subject about obtaining correlations between geotechnical tests.

Keywords: Liquid limit, plasticity of clays, fall cone, Casagrande cup, correlations .

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Gráfico de Plasticidade.....	26
Figura 2.2 – Concha de Casagrande.....	28
Figura 2.3– Cone de penetração para determinação do limite de liquidez	36
Figura 2.4 - Avaliação de outliers – boxplot.....	43
Figura 2.5 - Avaliação de outliers – limites superiores e inferiores no gráfico de dispersão de pares de valores.	44
Figura 2.6 - Regressão Linear Simples – Demonstração dos coeficientes do modelo de regressão linear.....	45
Figura 2.7 - Interpretação dos Testes de Hipóteses.....	47
Figura 2.8 - Exemplo de Histograma	50
Figura 2.9 - Exemplo de Gráfico de Probabilidade Normal.	51
Figura 2.10 - Padrões de comportamento para gráficos dos resíduos. (a) satisfatório, (b) funil, (c) arco duplo, (d) não linear.....	53
Figura 2.11 - (a) Classificação dos solos de acordo com UNI 10006:2002 e UNI 11531-1:2014; (b) detalhe dos solos com a classificação alterada.....	60
Figura 4.1 - Resultados experimentais de LLp - LLc das 15 publicações investigadas nesta pesquisa (n = 305 amostras ensaiadas).	68
Figura 4.2 - Resultados experimentais dos solos investigados no grupo B-01 (LLp - LLc-base dura), n = 206 amostras ensaiadas.	71
Figura 4.3 - Resultados experimentais dos solos investigados no grupo B-02 (LLp - LLc-base macia), n = 99 amostras ensaiadas.	72
Figura 4.4 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01i (LLp LLc-base dura) de 5 publicações investigadas nesta pesquisa (n=76 amostras ensaiadas) formados essencialmente por caulinitas e ilitas.....	74
Figura 4.5–Localização dos solos investigados no B-01i no ábaco de Casagrande.	75
Figura 4.6 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01ii (LLp - LLc-base dura) nesta pesquisa, com n = 41 amostras ensaiadas, formados essencialmente por montmorilonitas.	76
Figura 4.7 – Localização dos solos investigados no B-01ii no ábaco de Casagrande.	77

Figura 4.8 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01iii (LLp - LLc-base dura) de 9 publicações investigadas nesta pesquisa (n=163 amostras ensaiadas) formados por amostras de solos com $LLc < 80\%$	79
Figura 4.9 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01iv (LLp - LLc-base dura) de 7 publicações investigadas nesta pesquisa (n=43 amostras ensaiadas) formados por amostras de solos com $LLc > 80\%$	80
Figura 4.10 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02i (LLp - LLc-base dura) de 4 publicações investigadas nesta pesquisa, com n=38 amostras ensaiadas de caulinitas e ilitas.	88
Figura 4.11 – Localização dos solos investigados no B-02i no ábaco de Casagrande.	89
Figura 4.12 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02ii (LLp - LLc-base macia) de 3 publicações investigadas nesta pesquisa (n = 39 ensaios) formados essencialmente por montmorilonitas.	91
Figura 4.13 – Localização dos solos investigados no B-02ii no ábaco de Casagrande.	92
Figura 4.14 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02iii (LLp - LLc-base macia) de 3 publicações investigadas nesta pesquisa (n=46 amostras ensaiadas) formados por solos com $LLc < 60\%$	93
Figura 4.15 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02iv (LLp - LLc-base macia) de 4 publicações investigadas nesta pesquisa (n=53 amostras ensaiadas) formado por solos com $LLc > 60\%$	94
Figura 5.1 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01i e linhas de tendência dos resultados experimentais, LLp - LLc-base dura, após a exclusão dos outliers (n=71 amostras ensaiadas) para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e/ou ilitas com $20\% < LLc < 100\%$	101
Figura 5.2 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-01i: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp.	104
Figura 5.3 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01ii e linha de tendência dos resultados experimentais, LLp - LLc-base dura, após a exclusão dos outliers (n=39 amostras ensaiadas) para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas.	107

Figura 5.4 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-01ii: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp.....	108
Figura 5.5 – Dispersão dos novos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01ii e linha de tendência dos resultados experimentais, LLp - LLc-base dura, para após a exclusão dos outliers (n=24 amostras ensaiadas) para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas com LLc entre 115 e 460%.....	110
Figura 5.6 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01iii para 10 publicações após a exclusão dos outliers (n=156 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base dura para solos argilosos com LLc entre 20 e 80%	113
Figura 5.7 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-01iii: (a) Dispersão dos resíduos – LLc; (b) Dispersão dos resíduos - LLp.....	115
Figura 5.8 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01iv para 7 publicações após a exclusão dos outliers (n=41 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base dura para solos argilosos com LLc entre 80 e 460%	117
Figura 5.9 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02i para 3 publicações após a exclusão dos outliers (n=24 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base macia para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e/ou ilitas.	121
Figura 5.10 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-02i: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp.....	124
Figura 5.11 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02ii para 3 publicações (n=41 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base macia para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas.	126
Figura 5.12 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-02ii: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp.....	127
Figura 5.13 – Dispersão dos novos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02ii (n=35 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base dura para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas com LLc entre 50 e 400%.	129
Figura 5.14 - Plotagem de Probabilidade Normal dos resíduos para os novos dados do B-02ii.	130

Figura 5.15 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02iii para 4 publicações após a exclusão dos outliers (n=45 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base macia para solos argilosos com LLc entre 30 e 60%.....	132
Figura 5.16 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-02iii: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp.....	134
Figura 5.17 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02iv para 4 publicações (n=53 amostras ensaiadas) e correlação entre LLp - LLc-base macia para solos argilosos com $60\% < LLc < 400\%$	137
Figura 5.18 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-02iv: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp.....	138

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Especificações do dispositivo de Casagrande para limite de liquidez...	35
Tabela 2.2 - Modelos de cone de queda usados em diversos países.	38
Tabela 2.3 - Classificação da correlação dos dados a partir do coeficiente de determinação.....	49
Tabela 2.4 - Tabela de decisão em função de dU e dL.....	54
Tabela 2.5 - Correlações publicadas entre LLc e LLp. São informadas as variações de LL para cada correlação definida.....	61
Tabela 2.6 - Correlações publicadas entre LLc e LLp definidas para base macia do aparelho de Casagrande.....	62
Tabela 2.7 - Correlações publicadas entre LLc e LLp definidas para base dura do aparelho de Casagrande.....	62
Tabela 2.8 - Correlações publicadas entre LLc e LLp definidas para cone britânico (ângulo de 30 graus e peso de 80 g).	62
Tabela 2.9 - Correlações publicadas entre LLc e LLp definidas para cone sueco (ângulo de cone de 60 graus e 60 g de peso).	63
Tabela 4.1 - Resumo das publicações investigadas no grupo B-01 (LLp e LLc-base dura) com 206 amostras ensaiadas.....	69
Tabela 4.2 - Resumo das publicações investigadas no grupo B-02 (LLp e LLc-base macia) com 99 amostras ensaiadas.	70
Tabela 4.3 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01i (LLp e LLc-base dura), com n= 76 amostras ensaiadas de caulinitas e ilitas.....	74
Tabela 4.4 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01ii (LLp e LLc-base dura) com 41 amostras ensaiadas de solos formados essencialmente por montmorilonitas.	76
Tabela 4.5 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01iii (LLp e LLc-base dura), com n=163 amostras ensaiadas de solos com LLc<80%.....	78
Tabela 4.6 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01iv (LLp e LLc-base dura) com 43 amostras ensaiadas de solos com LLc>80%.....	80
Tabela 4.7 - Propriedades dos solos estudados por Wasti (1987).....	81
Tabela 4.8 - Propriedades dos solos estudados por Deka et al. (2009).	82
Tabela 4.9 - Distribuição granulométrica e classificação dos solos estudados por Ozer (2009).	83

Tabela 4.10 - Propriedades dos solos investigados por Di Matteo (2012).....	84
Tabela 4.11 - Composição química das argilas estudadas por Spagnoli (2012).	85
Tabela 4.12 - Propriedades dos solos estudados por Flores e Emidio (2014).	85
Tabela 4.13 – Distribuição Granulométrica e mineralogia dos solos estudados por Quintela et al. (2014).....	86
Tabela 4.14 - Resumo das 4 publicações e dos solos investigados no subgrupo B-02i (LLp e LLc-base macia), com n= 28 solos ensaiados formados essencialmente por caulinitas e ilitas.	89
Tabela 4.15 - Resumo das publicações e solos investigados no subgrupo B-02ii (LLp e LLc-base macia), com n= 39 amostras ensaiadas de solos formados essencialmente por montmorilonitas.	90
Tabela 4.16 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-02iii (LLp e LLc-base macia) com 46 amostras ensaiadas de solos com LLc<60%.	92
Tabela 4.17 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-02iv (LLp e LLc-base macia) com 53 amostras ensaiadas de solos com LLc>60%.	94
Tabela 4.18-Propriedades granulométricas dos solos estudados por Sousa (2011). ..	96
Tabela 4.19 Distribuição Granulométrica e mineralogia dos solos estudados por Nagaraj et al. (2012).....	97
Tabela 4.20 - Propriedades granulométricas dos solos estudados por Nagaraj et al. (2012).	97
Tabela 4.21 - Correlações lineares publicadas entre valores de LLc e LLp para diferentes solos argilosos. Ensaio realizado com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.....	98
Tabela 4.22 - Correlações lineares publicadas entre valores de LLc e LLp para diferentes solos argilosos. Ensaio realizado com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.	98
Tabela 5.1 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-01i	100
Tabela 5.2 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-01i) e outras correlações publicadas para LLc < 100%. Ensaio com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.....	102
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01i.....	103
Tabela 5.4 – Limite de Atterberg de minerais argilosos.	105
Tabela 5.5 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-01ii	106
Tabela 5.6 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01ii.....	108

Tabela 5.7 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-01ii) e outras correlações publicadas para $80\% < LLc < 460\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.....	111
Tabela 5.8 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-01iii.....	112
Tabela 5.9 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-01iii) e outras correlações publicadas para $LLc < 100\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.....	114
Tabela 5.10 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01iii.	115
Tabela 5.11 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-01iv	116
Tabela 5.12 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-01iv) e outras correlações publicadas para $80\% < LLc < 460\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.....	118
Tabela 5.13 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01iv.....	118
Tabela 5.14 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-02i	120
Tabela 5.15 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-02i) e outras correlações publicadas para $30\% < LLc < 50\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.	122
Tabela 5.16 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02i.....	123
Tabela 5.17 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-02ii	125
Tabela 5.18 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02ii.	126
Tabela 5.19 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-02ii) e outras correlações publicadas para $50\% < LLc < 400\%$ ou $50\% < LLp < 350\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.	131
Tabela 5.20 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-02iii	131
Tabela 5.21 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-02iii) e outras correlações publicadas para $30\% < LLp < 60\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.	133
Tabela 5.22 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02iii.	133
Tabela 5.23 - Resumo dos resultados de LLp e LLc avaliados no B-02iv	135
Tabela 5.24 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02iv.....	137
Tabela 5.25 - Comparação entre correlações lineares entre LLp e LLc: este trabalho (BD-02iv) e outras correlações publicadas para $50\% < LLc < 400\%$ ou $50\% < LLp < 350\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.	139

Tabela 5.26 - Resumo dos resultados das correlações avaliadas neste trabalho para cada banco de dados.	141
Tabela 5.27 - Pares de valores LLc-base dura e LLc-base macia obtidos de acordo com as Equações avaliadas neste trabalho	142

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>The American Association of State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
B	Conjunto de Dados
BNQ	<i>Quebec Standards Bureau</i>
BS	<i>British Standards</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
DW	<i>Durbin Watson</i> (teste estatístico)
EUROCODE	<i>European Commission</i>
F	<i>Fischer</i> (teste estatístico)
HRB	<i>Highway Research Board</i>
IP	Índice de Plasticidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KS	<i>Komolrogov-Smirnov</i> (teste estatístico)
LL	Limite de Liquidez
LL _c	LL determinado pelo método de Casagrande
LL _{c-base macia}	LL determinado pelo método de Casagrande de base macia
LL _{c-base dura}	LL determinado pelo método de Casagrande de base dura
LL _p	LL determinado pelo método de cone
LP	Limite de Plasticidade
MQO	Mínimo dos Quadrados Ordinários
NBR	Norma da ABNT
SC	Areia argilosa
SM	Areia siltosa
SUCS	Sistema Unificado de Classificação
SW	<i>Shapiro Wilk</i> (teste estatístico)
UNI	<i>Ente Nazionale Italiano di Unificazione</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{y}	Média amostral de y
\bar{x}	Média amostral de x
C_v	Coeficiente de variação
D'_{KS}	Valor Crítico do teste Kolmogorov-Smirnov
D'_{SW}	Valor Crítico do teste Shapiro-Wilk
D_{DW}	Resultado do teste Durbin-Watson
D_{KS}	Resultado do teste Kolmogorov-Smirnov
dL	Valor Crítico do teste Durbin-Watson
D_{SW}	Resultado do teste SW
dU	Valor Crítico do teste Durbin-Watson
e	Índice de vazios
e_i	Aleatoriedades estatísticas (resíduos)
G_s	Densidade real dos grãos
h	Umidade
H_0	Hipótese nula de testes estatísticos
H_1	Hipótese alternativa de testes estatísticos
i	Observação
LI	Limite inferior (estatística)
LS	Limite superior (estatística)
n	Número de observações
q_1	Primeiro Quartil
q_2	Mediana
q_3	Terceiro Quartil
r	Coeficiente de correlação de Pearson
R^2	Coeficiente de Determinação
R_c	Região de aceitação de testes estatísticos
R_c	Região crítica de testes estatísticos
S_u	Resistência ao cisalhamento não drenado
valor-p	Resultado de testes estatísticos
x_i	Variável independente (regressor)
y_i	Variável dependente

z	Profundidade
α	Nível de significância
β_0	Coeficiente da regressão linear (intercepto)
β_1	Coeficiente da regressão linear (inclinação)
μ	Média aritmética
ρ	Correlação entre resíduos sucessivos
σ	Desvio padrão da amostra
σ^2	Variância da amostra

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
1.1. Justificativa.....	22
1.2. Objetivos	22
1.2.1. Objetivos Gerais.....	22
1.2.2. Objetivos Específicos	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. Introdução	24
2.1.1. Classificação dos solos finos – Carta de Plasticidade.....	25
2.2. Método de Casagrande	27
2.2.1. Considerações gerais e definições	27
2.2.2. Variáveis associadas ao ensaio de Casagrande	29
2.3. Método do cone de penetração	36
2.3.1. Considerações gerais e definições	36
2.3.2. Variáveis associadas ao ensaio de cone	39
2.4. Métodos estatísticos	41
2.4.1. Considerações Gerais.....	41
2.4.2. Etapas de criação de uma correlação	42
2.4.3. Regressão Linear	45
2.4.4. Avaliação do Modelo de Regressão	46
2.5. Comparações e correlações entre os métodos de cone e de percussão	54
2.5.1. Considerações iniciais.....	54
2.5.2. Correlações previamente publicadas entre LL_c e LL_p	60
2.6. Considerações Finais do Capítulo 2.....	63
3. MATERIAL E MÉTODOS	64
4. DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA	66
4.1. Introdução	66
4.2. Dados utilizados.....	67
4.3. Descrição dos dados do grupo B-01	73
4.3.1. Descrição do subgrupo de dados B-01i.....	73
4.3.2. Descrição do subgrupo de dados B-01ii	75
4.3.3. Descrição do subgrupo de dados B-01iii	77

4.3.4.	Descrição do subgrupo de dados B-01iv	79
4.3.5.	Publicações utilizadas no B-01	81
4.4.	Descrição dos dados do grupo B-02	87
4.4.1.	Descrição do subgrupo de dados B-02i	88
4.4.2.	Descrição do subgrupo de dados B-02ii	90
4.4.3.	Descrição do subgrupo de dados B-02iii	92
4.4.4.	Descrição do subgrupo de dados B-02iv	93
4.4.5.	Publicações utilizadas no B-02	95
4.5.	Correlações publicadas entre LL_c e LL_p específicas para B-01 e B-02	98
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	100
5.1.	Resultados para dados do B-01	100
5.1.1.	Resultados B-01i	100
5.1.2.	Resultados para dados do B-01ii	106
5.1.3.	Resultados para dados do B-01iii	112
5.1.4.	Resultados para dados do B-01iv	116
5.1.5.	Conclusões parciais para o grupo de dados B-01	119
5.2.	Resultados para dados do BD-02.....	120
5.2.1.	Resultados B-02i	120
5.2.2.	Resultados BD-02ii.....	125
5.2.3.	Resultados B-02iii	131
5.2.4.	Resultados BD-02iv.....	135
5.2.5.	Conclusões parciais para o grupo de dados B-02.....	140
5.3.	Resumo dos resultados das correlações avaliadas no B-01 e no B-02.....	141
5.4.	Avaliação da influência da dureza da base do aparelho de Casagrande nas correlações entre LL_p e LL_c	141
6.	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
6.1.	Conclusões	143
6.1.1.	LL_c -base dura - LL_p	144
6.1.2.	LL_c -base macia - LL_p	146
6.2.	Sugestões para trabalhos futuros.....	147
	REFERÊNCIAS.....	148
	ANEXO I.....	154
	APÊNDICE A	158

1. INTRODUÇÃO

A propriedade que faz com que o sistema argila-água se deforme continuamente devido a ação de uma força finita, e quando a força é removida ou reduzida a forma é mantida, conhecida como plasticidade, é utilizada em muitas áreas da engenharia e da ciência. Vários fatores influenciam a plasticidade de uma argila, tais como, composição mineralógica, tipo de cátion trocável, presença de sais ou matéria orgânica, teor de umidade, e o processo de moldagem da argila (Andrade et al. 2011).

O valor máximo do teor de umidade de um solo argiloso na consistência plástica é definido como o Limite de Liquidez, LL, desse solo. O valor de LL é utilizado na classificação e avaliação preliminar de solos argilosos em obras de engenharia. E, a determinação errada de LL pode resultar na rejeição de materiais satisfatórios ou mesmo na aceitação de materiais inadequados (Bicalho et al., 2017).

Tradicionalmente, o procedimento mais utilizado para a determinação do Limite de Liquidez, LL_c , é o método de percussão padronizado por Casagrande (1932) que utiliza o aparelho desenvolvido pelo mesmo. Entretanto, o método de Casagrande apresenta elevada dispersão dos resultados devido à influência do operador e das condições do aparelho (Mendoza e Orozco, 2001; Sousa, 2011; Di Matteo, 2012; Mishra et al., 2012; Bicalho et al., 2017). Sowers et al. (1960) mencionam outras limitações do ensaio de percussão, como a dificuldade de se fazer a clássica ranhura em solos argilosos arenosos e o fato de que os solos de baixa plasticidade tendem a se liquefazer antes de fluir por plasticidade. O método de determinação do LL_c assume que a resistência ao cisalhamento não drenada, S_u , dos solos no limite de liquidez tem um valor constante (aproximadamente 2,5 kPa, ou seja, cada golpe para fechar a ranhura corresponde a uma resistência de 0,1 kPa). Entretanto, o valor de S_u medido no LL_c pode variar entre 0,5 e 5,6 kPa (Whyte, 1982; Wasti e Bezirci, 1986). Ou seja, estudos tem mostrado que o valor de S_u medido no LL_c diminui com o aumento do LL, que cresce com o teor de argila e plasticidade (Leflaive, 1971; Youssef et al., 1995; Leroueil e Le Bihan, 1996).

O método do Cone de Penetração para determinar o Limite de Liquidez, LL_p , denominado neste trabalho simplesmente método do cone, consiste em se medir a penetração estática que um cone padronizado sob determinadas condições especificadas de peso, ângulo e tempo de queda, penetra verticalmente em uma amostra de solo previamente preparada. O método do cone, não normatizado no Brasil, é uma alternativa atrativa ao método de percussão de Casagrande (1932).

Muitos pesquisadores (Budhu 1985; Sivapullaiah e Sridharan, 1985; Wasti e Bezirci, 1986; Christaras, 1991; Sridharan e Prakash, 2000; Dragoni et al., 2008; Ozer, 2009; Bicalho et al., 2017) observaram que os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e de cone não são idênticos. Dessa forma, vários estudos foram realizados para estabelecer correlações entre os dois métodos utilizados na determinação do Limite de Liquidez. Observa-se na literatura que as correlações entre LL_c e LL_p variam com o valor desse limite, visto que para solos de baixa a média plasticidade (LL de 20 a 50%), o LL_p é maior que o LL_c . Porém, para solos de alta plasticidade, o LL_c é maior que o LL_p (Di Matteo, 2012). Ou seja, verifica-se que (Leroueil e Le Bihan, 1996):

$$LL_c < LL_p, \text{ para } LL < LL^*$$

$$LL_c > LL_p, \text{ para } LL > LL^*$$

O valor de LL^* que define a transição entre os valores chamados de baixo LL e alto LL não é bem quantificado na literatura (Bicalho et al., 2014).

Sridharan e Prakash (2000) mostram que as argilas caulinitas e as argila montmorilonitas possuem diferentes mecanismos que controlam o valor do limite de liquidez dessas argilas: o LL de uma montmorilonita é controlado principalmente pela presença da camada de água adesiva presente no mineral argílico, enquanto que o LL da caulinita é principalmente controlado pelas forças entre as partículas do mineral argílico (ou seja, microestrutura).

O extenso banco de dados disponível com correlações entre os valores de LL_c e diferentes propriedades de engenharia motivam o estudo de comparações entre os valores do LL_c e LL_p . Além disso, os clássicos sistemas de classificações de solos finos usam valores de LL_c .

Assim, nesta dissertação são apresentadas e discutidas correlações entre LL_c (com aparelho de base dura e base macia) e LL_p para argilas de diferentes mineralogias e origens geológicas, bem como são investigados os valores de LL^* para esses solos argilosos.

1.1. JUSTIFICATIVA

O ensaio de determinação do LL_p apresenta, dentre outras vantagens, a baixa dependência da técnica do operador. No entanto, o ensaio de cone produz resultados diferentes em relação ao ensaio de determinação de LL_c , tradicionalmente utilizado no Brasil. Portanto, o uso de equações que correlacionem os resultados desses ensaios são ferramentas necessárias na engenharia, uma vez que os valores de LL de solos argilosos são frequentemente considerados nas avaliações preliminares dessas argilas para uso em obras de geotecnia em geral, como fundações e aterros. Dessa forma, a determinação adequada do LL dos solos se faz necessária, uma vez que o valor de LL errado pode resultar na rejeição de materiais satisfatórios ou na aceitação de materiais inadequados.

Como os ensaios de determinação de LL_c e LL_p possuem metodologias diferentes e fornecem valores distintos, sendo que essas dispersões são maiores ou menores de acordo com a plasticidade e mineralogia do solo, o uso dessas correlações requer o julgamento de suas limitações e aplicações.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivos Gerais

Com o intuito de aprofundar os estudos referentes às correlações entre os ensaios de determinação de LL_c e LL_p , esta dissertação tem como objetivo geral avaliar correlações empíricas entre LL_c e LL_p para argilas de diferentes mineralogias e plasticidades, bem como investigar os valores dos intervalos de LL em que se observa maiores variações entre LL_c e LL_p .

São discutidos os procedimentos e equipamentos utilizados, funcionamento dos dois aparelhos e os fatores que influenciam nas correlações entre LL_c e LL_p . Além disso, são comparados os resultados obtidos neste estudo com os resultados previamente publicados em outros trabalhos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- i. Avaliar estatisticamente correlações entre LL_c e LL_p para argilas de mesmas plasticidades e origem geológica;
- ii. Avaliar estatisticamente correlações entre LL_c e LL_p para argilas de diferentes plasticidades e origem geológica;
- iii. Investigar os intervalos de valores de LL em que foram observadas maiores variações e menores variações entre LL_c e LL_p para diferentes solos argilosos. Ou seja, definir as características geotécnicas e de execução do ensaio/aparelho dos solos em que o valor do resíduo ($LL_c - LL_p$) é considerado estatisticamente desprezível ou não e discutir as razões das variações observadas.
- iv. Avaliar a influência da dureza da base do aparelho de Casagrande nas correlações entre os dois ensaios.
- v. Comparar as correlações sugeridas neste estudo com as correlações publicadas na literatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. INTRODUÇÃO

O Limites de Atterberg de um solo argiloso, dentre eles o limite de liquidez, são os parâmetros mais comumente especificados na engenharia geotécnica para uso em aplicações de engenharia civil e adotados para a classificação de solos finos. Os Limites de Atterberg são aplicados em finalidades, tais como estimar a resistência ao cisalhamento, deformação e parâmetros críticos da mecânica dos solos (Kelly et al., 2017).

Na teoria, o limite de liquidez de um solo é a umidade na qual ele transita do comportamento líquido para plástico. Como o solo nunca tem resistência ao cisalhamento zero, o LL é determinado como a umidade associada a uma resistência ao cisalhamento arbitrariamente escolhida (baixa) em um comportamento sempre enfraquecedor com o aumento da umidade. O valor de LL é fortemente dependente da composição e das propriedades mineralógicas do solo, particularmente aquelas da fração argila, e também a quantidade de água entre camadas, no caso de minerais argilosos expansivos (Kelly et al., 2017).

Sousa (2011) comenta ainda que, em solos constituídos essencialmente por silte e argila, a umidade é um parâmetro fundamental na previsão do comportamento, pois a sua variação pode conduzir a diferentes estados físicos. Enquanto em um solo granular o índice de vazios (e) não depende da umidade (h), em um solo coesivo saturado este índice é pura consequência do mesmo.

Para a determinação do limite de liquidez de um solo argiloso, existem atualmente duas metodologias distintas, cujos resultados apresentam algumas variações e são motivo de discussões e comparações. Tais métodos são a concha de Casagrande e o cone de penetração. O método de cone foi aceito como o método padrão em muitos países como Inglaterra, Índia e Canadá. O método de Casagrande ainda é adotado oficialmente em muitos países, tais como Brasil e Portugal.

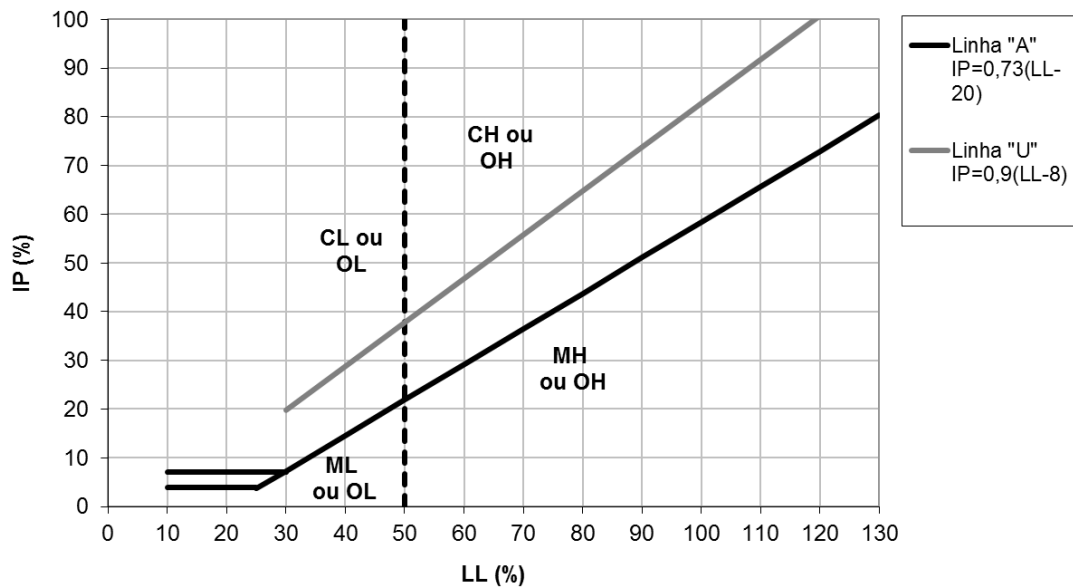
2.1.1. Classificação dos solos finos – Carta de Plasticidade

A classificação de solos torna possível caracterizar partículas sólidas de acordo com seu tamanho, forma e composição mineralógica. Alguns métodos de classificação são baseados na distribuição de tamanho de grão, e os limites de separação entre os vários tipos podem ser distintos em função das normas adotadas (ASTM e BS, por exemplo).

A partir da definição de plasticidade do solo (Atterberg, 1911) foi incluído por Casagrande (1932, 1948) o gráfico de plasticidade, em que o índice de plasticidade, IP, é plotado contra o limite de liquidez, LL (Figura 2.1). Este gráfico é dividido em duas zonas separadas pela linha A [$IP = 0,73 (LL-20)$], o que nos permite distinguir os pontos que se encontram acima da linha A (argilas, C) e os pontos que se encontram abaixo da linha (siltes, M). Todas as cartas de plasticidade relatadas pelos vários padrões para a classificação de solos finos apresentam essa característica em comum. A linha A foi definida por Casagrande (1948) empiricamente com base em evidência experimental. De acordo com a ASTM (D2482), os siltes e as argilas orgânicas ou inorgânicas são classificadas como de baixa (L) a alta (H) plasticidades quando o seu valor de limite de liquidez é inferior ou superior a 50%, respectivamente. Finalmente, argila siltosa de baixa plasticidade, grupo (CL-ML), é definida por valores de índice de plasticidade entre 4 e 7 (Polidori, 2002).

No clássico gráfico de plasticidade (ASTM, 1990) a linha A separa o silte das argilas, para os casos de solos inorgânicos. Os siltes são apresentados abaixo da linha A e as argilas são apresentadas acima da linha A. A linha U, determinada empiricamente, significa o limite superior aproximado para solos naturais, e consiste numa boa verificação quanto à existência de dados errados. Portanto, quaisquer resultados de ensaio que recaiam acima (ou à esquerda) desta linha U, devem ser verificados.

Figura 2.1 - Gráfico de Plasticidade



Fonte: ASTM (1990).

A utilização do gráfico de Plasticidade (ASTM, 1990) para localização de tipos de argila específicas foi considerada por muitos pesquisadores (Casagrande, 1948; Martin e Lambe, 1957; Grim, 1962; Dumbleton e Oeste, 1966), geralmente, numa tentativa de definir a contribuição de um componente de argila para as propriedades de engenharia do solo, como um todo. No entanto, a aplicação do gráfico é limitada e bastante restritiva para a identificação do mineral argiloso, pois alguns minerais argílicos podem ser encontrados em ambos os lados da linha A (Bain, 1971).

Quanto à classificação de solos com base no tamanho das suas partículas, a norma britânica (BS 1322), por exemplo, distingue tipos de solo de acordo com os seguintes critérios: argila é fração do solo com partículas $< 2 \mu\text{m}$; silte é fração do solo com partículas entre $2\text{-}60 \mu\text{m}$; e areia é definida pelas partículas de $60\text{-}425 \mu\text{m}$. Sabe-se que a plasticidade de um solo depende essencialmente do tipo e quantidade de minerais de argila que estão presentes. Estes minerais de argila podem ser avaliados com precisão apenas através de análise mineralógica.

Polidori (2002) ressalta que, em avaliações de rotina de propriedades do solo, é geralmente assumido que a fração menor do que $2 \mu\text{m}$ (diâmetro equivalente) é

composta inteiramente de minerais de argila. Na prática, uma parte da fração menor do que 2 μm pode ser composta por partículas não-argilosas. Isso só deve resultar em uma subestimação da plasticidade dos minerais argílicos que estão presentes.

2.2. MÉTODO DE CASAGRANDE

2.2.1. Considerações gerais e definições

O método de Casagrande foi concebido e depois modificado por Casagrande (1932, 1958). Conforme mostrado na Figura 2.2, o aparelho consiste numa concha semiesférica que é deixada cair repetidamente de uma altura de 1 cm sobre uma base de borracha, macia ou dura, através do uso de um mecanismo de manivela e engrenagens. O aparelho contém também um contador de golpes, que facilita a operação e um riscador ou cinzel com a qual se procede à abertura da ranhura que irá separar em duas porções a mistura de solo com água destilada. O procedimento do ensaio, padronizado no Brasil pela norma da ABNT NBR 6459, estabelece que, ao girar a manivela numa frequência de dois golpes por segundo, a ranhura se fechará quando a parte inferior das duas metades se unirem ao longo de, pelo menos, 13 mm (aproximadamente). Então, anota-se o número de golpes e em seguida reserva-se uma amostra de solo na zona de contato, para determinação da umidade da mesma. Tendo-se o número de golpes para fechar o sulco feito na amostra e as umidades correspondentes, a partir daí constrói-se o gráfico com as coordenadas número de golpes *versus* umidade. Para o intervalo compreendido entre 6 e 35 golpes, pode-se considerar como uma reta. Em seguida, obtém-se na reta o teor de umidade correspondente a 25 golpes, que é o limite de liquidez do solo. Recomenda-se a determinação de, pelo menos, 6 pontos.

Figura 2.2 – Concha de Casagrande



Antes da colocação da amostra do solo na concha, o mesmo deve ser preparado com adição de água destilada em pequenos incrementos, amassando vigorosamente com o auxílio de uma espátula, obtendo-se uma pasta homogênea, com consistência tal que sejam necessários aproximadamente 35 golpes para fechamento da ranhura. Em seguida, parte da mistura deve ser transferida para a concha, moldando-a de forma que na parte central, a espessura seja na ordem de 10 mm. Após a realização do ensaio com a obtenção da umidade correspondente ao número de golpes para fechamento da ranhura, adiciona-se água destilada na amostra e repete-se todo o processo descrito anteriormente por pelo menos 5 vezes.

Diferentes procedimentos de ensaio podem resultar em valores divergentes de limite de liquidez, para um mesmo solo. Casagrande (1958) reconheceu que o método de percussão para obtenção do limite de liquidez evoluiu de forma diferente em diversos países, uma vez que a dureza da base não foi determinada na especificação original. Diversos padrões sugeriram o uso de diferentes tipos de bases para realizar o teste. O padrão americano prefere um aparelho com uma base dura (ASTM D4318 2000), enquanto que a norma britânica especifica uma base macia (BS: 1377-parte 2 1990). Estas diferenças na especificação têm persistido desde então, agregando complexidade e divergências na determinação do limite de

liquidez, o qual é determinado pelo método do cone em grande parte da Europa (Haigh, 2015). Em comparação com a base dura, o método de percussão com uma base macia resulta em maiores valores do limite de liquidez (Norman, 1958; Casagrande, 1958; Whyte, 1982).

Erros durante a execução dos ensaios de determinação de LL podem muitas vezes levar a interpretações equivocadas sobre determinado solo, quando a partir desses resultados procura-se estimar as características de resistência e compressibilidade do solo.

2.2.2. Variáveis associadas ao ensaio de Casagrande

O ensaio de Casagrande apresenta diversas limitações, associadas às variáveis dos solos e à influência do operador e das condições do aparelho. Além disso, solos de baixa plasticidade tendem a se liquefazer antes de fluir por plasticidade. Casagrande (1932) afirmou que os maiores erros no teste LL são causados pela altura de queda indevida da concha e incorreta formação de ranhura do solo.

2.2.2.1. Tipo de solo

Sousa (2011) comentou sobre a sensibilidade do dispositivo de Casagrande aos solos com baixa plasticidade. A presença de areia pode criar dificuldades na abertura da ranhura e solos de baixa plasticidade deslizam frequentemente mais rápido ao longo da concha que os de plasticidade elevada. Além disso, a baixa plasticidade dos solos tende a segregar a água e alguns constituintes, como resultado dos golpes, refletindo no escorregamento do material na concha. Em casos como este, o limite de liquidez não pode ser determinado corretamente sendo preferível assumir o limite de liquidez igual ao de plasticidade, isto é, o índice de plasticidade é nulo. Devido ao fato de o dispositivo de Casagrande ser um ensaio dinâmico, os solos de baixa plasticidade tendem, naturalmente, a assumir um comportamento líquido após os impactos, com tendência para fechar a ranhura (Sousa, 2011).

2.2.2.2. Preparação da amostra

Freitas Junior (1974) investigou a influência dos métodos de preparação e tratamento da amostra para realização dos ensaios e concluiu que podem provocar dispersões significativas nos resultados, conduzindo assim a interpretações errôneas quanto ao comportamento do solo. Quanto à água acrescentada durante a preparação da amostra, o pesquisador concluiu que esta deve apresentar teor iônico semelhante ao da contida nos vazios da amostra, de forma a não alterar o comportamento químico-coloidal característico do material ensaiado. Dessa forma, é aconselhável padronizar o uso de água destilada, uma vez que esta é inerte do ponto de vista iônico, ao contrário das águas comuns, cuja composição varia para cada lugar, formando soluções com distintos valores de pH. Após a secagem prévia, a amostra é trabalhada adicionando-se água, de forma a trazer a amostra para umidade próxima do limite de consistência. Dessa forma, todas essas operações podem acarretar significativas mudanças nas características de alguns solos. Tempo e processo de homogeneização também são relevantes, uma vez que a eficácia da homogeneização e a tixotropia influenciam em certos solos, de maneira intensa, as interações entre os resultados de limite de liquidez e a resistência ao cisalhamento da amostra (Freitas Junior, 1974).

Santanna (1998) afirma ainda que este método para determinação de limite de liquidez mostra-se falho para solos tropicais, pois a espatulação intensa de solos tropicais lateríticos e saprolíticos, para a preparação do ensaio no aparelho de Casagrande, é uma das causas de dispersão de resultados e ensaios efetuados por operadores diferentes. O pesquisador explica que a intensa espatulação de solos lateríticos provoca a elevação de LL e LP. Já a intensa espatulação de solos saprolíticos micáceos e/ou caulíníticos ocasiona uma redução de LL e IP.

A secagem prévia do material representa um dos problemas principais na preparação da amostra, em especial para solos argilosos com umidades naturais acima do limite de plasticidade. No entanto, os métodos da ASTM e da ABNT não padronizam o tempo de secagem que, em alguns casos, pode ser intensa e

consequentemente impossibilitando que a amostra se aproxime novamente do “equilíbrio” com a água adicionada para torná-la novamente plástica (Freitas Junior, 1974).

Freitas Junior (1974) avaliou um programa de ensaios com amostras representativas de solos brasileiros e mostrou que a homogeneização pode alterar em até 10% no valor do resultado de LL_c . Esses ensaios também tinham como finalidade a determinação de um possível efeito de abrasão do material, devido ao contato com a placa. Os resultados dos ensaios realizados com duas superfícies diferentes mostraram que o tipo de superfície não influencia de maneira sensível nos resultados dos ensaios, para um mesmo tempo de homogeneização. Os resultados obtidos nos ensaios mostraram a importância da padronização do tempo de homogeneização, podendo alterar sensivelmente os resultados. Foi observado nesses ensaios que, para maior número de pontos para o traçado da “curva de fluidez” (umidade e número de golpes) maior dispersão apresentavam os últimos pontos, pois a amostra para esses pontos sofre um processo de homogeneização muito intenso em relação aos pontos iniciais. Assim, no ensaio de limites, o traçado da curva de fluidez acima de cinco pontos pode não levar necessariamente a uma maior precisão, em função da alteração sofrida pelo material no processo de preparação de cada ponto (Freitas Junior, 1974).

2.2.2.3. Aspectos físicos do aparelho

Sousa (2011) também comentou sobre a sensibilidade do dispositivo em relação aos aspectos físicos do mecanismo, tais como: dimensões e formato da ferramenta de abertura da ranhura (cinzel), dureza, dimensão e ressaltos da concha na base e formato da concha.

Em 1932, Casagrande introduziu um dispositivo para abertura da ranhura, idêntico a uma espátula com uma ponta pronunciada. Ao formar a ranhura, este utensílio tem a vantagem de calibrar a espessura do solo, até mesmo na zona mais funda, de 1 cm como estabelece a norma. Algumas desvantagens também são conhecidas, como a não conformidade das dimensões da ranhura, de acordo com as especificações ASTM, e a dificuldade de manter a perpendicularidade com a concha de forma a

obter a direção e dimensões pretendidas. Mais tarde foi desenvolvido um novo utensílio para abertura da ranhura (cinzel ou riscador), pelo Bureau of Public Roads, que se encontra normalizado segundo a ASTM (Sousa, 2011). Este segundo utensílio tem a vantagem de manter as dimensões do material colocado na concha. A sua maior desvantagem é, segundo Kestler (1982), a tendência de causar baixa plasticidade em solos ao separa-los em duas metades, através do deslizamento ao longo da superfície exterior da concha. Kestler (1982) efetuou a comparação do limite de liquidez obtido através destes dois utensílios em dois tipos de argilas, argilas plásticas e argilas azuis de *Boston*.

2.2.2.4. Técnica do operador

O ensaio de percussão também apresenta sensibilidade à técnica do operador, uma vez que a quantidade de solo colocado na concha irá influenciar nos valores do limite de liquidez. Solo em excesso irá provocar uma ranhura profunda, exigindo que o solo possua uma elevada coesão para suportar os 25 golpes (Sousa, 2011). A coesão do solo, propriedade definida como uma força de atração entre as superfícies de suas partículas, podendo ser real ou aparente, varia inversamente com a umidade. Assim, para solo em excesso, o limite de liquidez tenderá a ser menor que para a quantidade de solo ideal. No caso de haver menos solo na concha, os resultados são aproximadamente o inverso do caso anterior (Kestler, 1982).

Considerada por alguns pesquisadores como uma variável que influencia diretamente nos resultados obtidos, a frequência dos golpes encontra-se atualmente especificada pela ASTM, na razão de dois golpes por segundo. Dessa forma, existe alguma dependência entre o limite de liquidez e a frequência dos golpes, como observado por Kestler (1982), o qual testou frequências acima e abaixo de dois golpes por segundo. Foi observado no estudo que essa dependência é mais significativa nos casos onde a frequência está abaixo dos dois golpes por segundo. No caso contrário, ou seja, frequência acima de dois golpes por segundo, os resultados tendem a alinhar com a reta original, correspondendo os dois golpes por segundo.

Sousa (2011) também estudou a variação dos resultados de LL_c em função da técnica do operador, concluindo-se que este quesito é uma das variáveis com maior

importância, senão a mais importante, uma vez que pode provocar maior variação no resultado. Esta variação torna-se ainda maior quando os operadores são de diferentes laboratórios, onde o aparelho e a metodologia seguida são distintos.

2.2.2.5. Dureza da base e resiliência

Segundo Sousa (2011), a concha de Casagrande pode apresentar bases com diferentes durezas (dura ou macia), sendo que a diferença na dureza da base irá influenciar nos resultados obtidos, como mencionado por Casagrande (1958) e investigado por Ozer (2009) e Haigh (2015).

Ozer (2009) comparou e correlacionou os resultados LL_c obtidos pela base macia e pela base dura. Os valores de LL_c de 42 amostras de solos naturais de vários locais na Turquia foram determinados por aparelhos de percussão com ambas durezas da base. Além disso, foram determinados os valores de LL_p de 32 destas amostras, de acordo com BS 1377: Parte 2 (1990), e comparados com os valores de LL_c . Foi observado que os valores de LL_c determinados pela base macia foram até 5% mais elevados do que os obtidos pela base dura.

As relações das Equações 2.1 e 2.2 foram obtidas por Ozer (2009), onde $LL_{c-base\ macia}$ é o LL_c determinado pelo aparelho de Casagrande de base macia e $LL_{c-base\ dura}$ é o LL_c determinado pelo aparelho de Casagrande de base dura.

$$LL_{c-base\ macia} = 1,015 LL_{c-base\ dura} + 1,809 \quad (2.1)$$

$$LL_{c-base\ dura} = 0,982 LL_{c-base\ macia} - 1,602 \quad (2.2)$$

A influência da dureza da base do aparelho no valor de LL_c foi também investigada por Haigh (2015). A partir da síntese de investigações por Norman (1958), Sridharan e Prakash (2000) e Dragoni et al. (2008) o pesquisador mostra que pelo método de base macia obtém-se valores LL_c mais elevados em relação a base dura, sendo que foi definida uma regressão linear para os dados conforme Equação 2.3.

$$LL_{c-base\ dura} = 0,904 LL_{c-base\ macia} + 0,44 \quad (2.3)$$

Ozer (2009) menciona que, no método de percussão, uma parte da energia produzida ao cair a concha de uma altura de 10 mm é absorvida pela base e a outra parte é refletida de volta para a amostra de solo. Quando uma base macia é utilizada, mais energia será absorvida pela base e, portanto, será necessário aplicar um maior número de golpes para fechar a ranhura da amostra. Embora existam dois tipos principais de aparelhos de determinação de LL_c , aqueles com bases duras e os com bases macias, as especificações para esses dois tipos de aparelhos não é bem definida. Os resultados obtidos no estudo de Ozer (2009) foram consistentes quanto a essa questão, mas como as diferenças variaram, podem existir outros fatores que controlam esta diferença.

Além da dureza, a resiliência da base é um parâmetro importante na determinação da natureza do impacto entre a concha e a base. A resiliência é definida como a relação entre a altura de rebote e a altura inicial de queda de uma bola caindo verticalmente na base. Esta razão é normalmente perto de 90% para os aparelhos com base dura à base de plástico relativamente rígidos, tais como os definidos pela ASTM, e cerca de 30% para as bases macias à base de borracha, por exemplo os definidos pela norma britânica (Haigh, 2015). A Tabela 2.1 apresenta as especificações do aparelho de Casagrande de alguns países quanto à dureza da base e à resiliência.

Tabela 2.1 - Especificações do dispositivo de Casagrande para limite de liquidez.

	País	Norma	Dureza da base	Módulo de Young equivalente* (MPa)	Resiliência (%)	
Base dura	EUA	ASTM D4318 (2010)	80 -90 D	260 - 446	77 - 90	
	Canadá	CAN/BNQ 2501-090 (2005)	micarta ou borracha dura	-	75 - 85	
	Brasil	NBR6459 (1984)	ebonite	~500	74 - 92	
	Alemanha	DIN18122-1 (1997)	>80 D	>260	80 - 90	
				~500	-	Substituída por ISO/TS 17892-12 (2004) - Ensaio cone de penetração
	Suécia	SS27119 (1989)	ebonite			
	Espanha	UNE 103103 (1994)	80 -90 D	260 - 446	75 - 90	
	África do Sul	SANS3001-GR10 (2013)	borracha dura	-	80 - 90	
		TMH1 (1986)	85 -95 D	340 - 585	-	
	Coréia do Sul	KSF2303 (2000)	83 -93 A	11 - 31	-	
Base macia				11 - 31	-	Resiliência típica 15 % - 40 % (Kazama e Shimobe, 1997) Ensaio cone de penetração preferencialmente
	Japão	JIS A1205 (1999)	83 -93 A			
	Reino Unido	BS1377-2 (1990)	84 - 94 IRHD	11 - 28	20 - 35	
	Austrália	AS1289.3.1.1 (2009)	86 - 94 IRHD	13 - 28	-	
	Índia	IS2720 (1985)	86 - 90 IRHD	13 - 18	30 - 40	
Ou	Nova Zelândia	NZS4402 (1986)	79 - 99 IRHD	8 - 221	-	
	Suíça	SN670345a (1989)	Não especificado	-	-	
	França	NFP94-051 (1993)	Não especificado	-	-	Densidade 1250 - 1300 kg/m3 Resistência a compressão 180 - 220 MPa

* Valores do módulo de Young equivalente são estimados a partir da dureza de borracha usando fórmulas de Gent (1958) para a dureza e Hertz e Farinella (1998) para IRHD.

Fonte: A partir de Haigh (2015)

2.3. MÉTODO DO CONE DE PENETRAÇÃO

2.3.1. Considerações gerais e definições

O método de cone de penetração, desenvolvido na Suécia (Hansbo, 1957), consiste em um cone de metal de determinados peso e ângulo do ápice, suspenso verticalmente sobre uma amostra de solo remoldado. Conforme mostrado na Figura 2.3, o cone cai por gravidade, penetra na amostra, e a distância de penetração está correlacionada com o teor de água para determinar o valor LL_p . Uma vantagem deste método de cone é que podem ser testadas amostras do solo tanto intactas quanto remoldadas (Lee e Freeman, 2007). Com os valores de teor de umidade (h) e penetração (d) constrói-se um gráfico, no qual as ordenadas são as penetrações e as abscissas os correspondentes teores de umidade. Em seguida, interpola-se uma reta entre os pontos determinados no gráfico. O LL_p é expresso pelo teor de umidade correspondente à penetração de 10, 17, 20 ou 25 mm, dependendo do país de origem, para os diversos pesos e geometrias do cone (Koester, 1992; Silveira, 2001).

Figura 2.3 – Cone de penetração para determinação do limite de liquidez



O método do cone consiste essencialmente na avaliação da resistência ao cisalhamento do solo, baseando-se no trabalho de Hansbo (1957) que relacionou a profundidade de penetração (d) de um cone de queda de peso W com a força de cisalhamento não drenada do solo por meio da Equação 2.4, onde K é o fator de cone. O efeito do ângulo do cone no fator K da Equação 2.4 foi estudado por vários pesquisadores (Houlsby, 1982; Wood, 1985). O resultado de LL_p sofre menor influência do equipamento e da execução em relação ao resultado de LL_c , sendo que na maioria das localidades utiliza-se o padrão britânico (30° - 80g), o que corresponde a uma força de cisalhamento não drenada de aproximadamente 1,7 kPa (Kelly et al., 2017).

$$S_u = \frac{KW}{d^2} \quad (2.4)$$

Conforme mencionado por Kelly et al. (2017), verifica-se que outros cones com diferentes ângulos e massas são usados, como o cone sueco (60° - 60g), também foram relatados cones não padronizados, por exemplo, um cone 30° e 148g foi usado no estudo de Sivapulliah e Sridharan (1985). Assim, existem variações nos valores de LL_p especificados em códigos diferentes, uma vez que envolve cones com características diferentes, e como tal, a resistência ao cisalhamento não

drenada assumida para a condição LL_p varia um pouco entre as diferentes normas. Assim, conforme mostrado na Tabela 2.2, existem numerosas variações do ângulo, peso e penetração do cone em todo o mundo. A profundidade de penetração depende do peso e do ângulo do vértice do cone. Por exemplo, cone britânico especifica uma penetração valor de 20 mm, enquanto que, o cone sueco especifica um valor de penetração de 10 mm como o LL_p do solo. No entanto, recentes estudos indicaram que ambos os tipos de testes de penetração de cone dão resultado idêntico (Farrell, 1997).

Tabela 2.2 - Modelos de cone de queda usados em diversos países.

País	Ângulo do cone (°)	Peso do conjunto (g)	Penetração no LL (mm)
Suécia	60	60	10
Índia	31	148	25,4
Estados Unidos	30	75	10
França	30	80	17
Inglaterra (BS 1377: Parte 2, 1990)	30	80	20
Canada (BNQ 2501-092)	60	60	10

Fonte: adaptado de Sousa (2011).

Segundo Kestler (1982), contrariamente ao verificado no mecanismo da concha de Casagrande, a relação entre o teor de água e a penetração é aproximadamente linear, ou seja, uma pequena variação do teor em água das amostras não irá influenciar fortemente na penetração obtida.

O método de cone consiste em um teste mecânico, não sendo necessário o julgamento do operador como ocorre no método a percussão, mas foi calibrado para dar essencialmente o mesmo resultado para solos com baixos índices de plasticidade (Vardanega et al., 2014).

Koumoto e Houlsby (2001) fizeram uma análise teórica detalhada da mecânica método de cone, e indicaram sensibilidade dos resultados de LL_p em função do ângulo e rugosidade da superfície do cone, bem como do seu hasteamento.

Nos anos 70, surgiu pela primeira vez uma norma para este ensaio, representada pela British Standards Institution (BS) – Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes (BS 1377: Parte 2, 1990) precedida pela norma Canadense, Quebec Standards Bureau (BNQ) 2501-09. Estas duas normas referem o método de cone como o eleito para o estudo dos limites de consistência, mais precisamente para a determinação do LL (Sousa, 2011).

O cone penetra até uma certa profundidade, dependendo em parte da resistência ao cisalhamento não drenada do solo. A penetração do cone de queda depende, na verdade, do teor de água. O tipo de solo e a preparação de amostras também podem influenciar no valor de LL obtido usando o cone de queda.

Kumar e Muirwood (1999) afirmaram que o LL_p diminui linearmente com o teor de argila, C , quando C é menor do que cerca de 30 a 40%, para testes em caulinitas misturadas com cascalho fino e utilizando cone britânico. O processo de colocação de solo no copo especificado na BS 1377, Parte 2, Método 4 (British Standards Institution 1990) é influenciado pelo julgamento do operador, e pode fornecer resultados inconsistentes se a colocação do solo não é uniforme.

2.3.2. Variáveis associadas ao ensaio de cone

Ao contrário do método de Casagrande, de acordo com Kestler (1982), a técnica do operador no ensaio do cone de penetração é uma variável que representa pequena importância, uma vez que variação no limite de liquidez será muito pequena. Nos itens 2.3.2.1 e 2.3.2.2 são discutidos os fatores que possuem maior influência sobre os resultados no método estático de determinação do LL.

2.3.2.1. Tempo de penetração

O tempo de penetração relacionado com o LL_p é uma variável muito importante que tem despertado algumas discussões sobre a sua duração. De acordo com Sousa (2011), após o cone ser largado e penetrado na mistura de solo e água destilada, o seu movimento deve ser deixado livre durante alguns segundos. Pela norma britânica (BS 1377: Parte 2, 1990), esse período deverá ser aproximadamente 5 ± 1 s, bloqueando de seguida o mecanismo de queda e anotando a leitura final.

Kestler (1982) observou o tempo de penetração de uma maneira simples: o cone é lançado durante 1 segundo, verificando a sua profundidade de penetração. Em seguida, larga-se novamente o cone durante 9 a 10 segundos, mas agora de uma altura que corresponde à altura máxima de queda menos o valor da penetração após 1 s. Seguidamente, são feitas mais duas leituras da penetração aos 20 e aos 30 s, respectivamente, com menor altura de queda após descontar a altura dos 10 s. Por fim, quando as leituras da penetração começarem a ficar constantes ao longo do tempo, significa que se atingiu o tempo de queda ideal para o ensaio.

2.3.2.2. Características do cone

De acordo com Kestler (1982), em argilas de média a elevada rigidez, a penetração do cone é relativamente baixa. De forma a reduzir o efeito provocado por este fenómeno, deve-se aumentar o peso do conjunto de penetração. No entanto, esta variável carece ainda de maiores estudos para determinar o limite de incremento do peso, de forma a não provocar erros nos valores obtidos.

Apesar de a penetração do cone ser em função da coesão do material ensaiado e do atrito da superfície do cone com o solo, a textura da superfície do cone também é uma variável que, dentre todas as outras, menor efeito pode provocar sobre o resultado do LL_p (Sherwood e Ryley, 1970). No entanto, Azadi e Monfared (2012) observaram que a influência da rugosidade no LL_p é menor para cones de 30° quando comparado a cones de 60° .

Azadi e Monfared (2012) também observaram que o ângulo do cone influencia significativamente no valor do LL_p , de forma que os cones de 30° apresentam penetrações maiores quando comparados aos cones de 60° . Além disso, essa diferença é maior para maiores valores umidade do solo.

Quanto à sobrecarga, a influência desse parâmetro também foi avaliada por Azadi e Monfared (2012), sendo maior quando comparada a rugosidade do cone quando comparadas com cones de mesmo diâmetro. Já para cones de diferentes diâmetros, a influência do peso do cone pode superar o efeito da rugosidade, sendo este efeito notado de forma mais intensa em solos de argila siltosa do que em silte argiloso. Por fim, os pesquisadores estudaram a influência dos parâmetros do ensaio do cone de penetração (ângulo, diâmetro, sobrecarga, rugosidade da superfície) e observaram que, quando esses parâmetros são modificados de maneira conjunta, a influência de cada fator pode ser mais significativa no valor de LL_p . Por exemplo, quando se tem um cone de maior diâmetro e peso, a modificação na rugosidade aumenta o valor do LL_p de maneira mais significativa quando comparado a cones de menores diâmetros e pesos.

2.4. MÉTODOS ESTATÍSTICOS

2.4.1. Considerações Gerais

Santos (2017) define que a estatística procura encontrar ou aperfeiçoar sistemas matemáticos capazes de descrever fenômenos da natureza e da produção que variam a cada observação. Assim, após a identificação do problema a ser estudado, verificam-se os fatores determinantes que podem afetar os resultados, coletam-se os dados por meio de experimentos e, finalmente, refina-se e determina-se o melhor modelo que expresse o problema.

Montgomery e Runger (2009) ressaltam que métodos estatísticos são utilizados para possibilitar o entendimento da variabilidade, que significa que sucessivas observações de um sistema ou fenômeno não produzem exatamente o mesmo resultado. Sabe-se ainda que a variabilidade depende de muitos fatores, os quais são chamados de fontes potenciais de variabilidade no sistema. Assim, a Estatística fornece uma estrutura para descrever essa variabilidade e para aprender sobre quais fontes potenciais de variabilidade são mais relevantes.

O objetivo deste trabalho consiste em encontrar correlações confiáveis entre os resultados de limite de liquidez dos solos obtidos pelos métodos de Casagrande (LL_c) e do Cone de Penetração (LL_p). Por equações de correlação entendem-se que

são modelos empíricos que tentem explicar a relação entre variáveis aleatórias observadas em experimentos, levando-se em conta as fontes potenciais de variabilidade que as influenciam.

A Análise de Regressão consiste numa técnica para modelar e investigar a relação entre duas ou mais variáveis. Tal relação muitas vezes se faz necessária nos problemas no âmbito da engenharia.

2.4.2. Etapas de criação de uma correlação

Santos (2017) orienta que, para encontrar uma correlação, primeiramente deve-se realizar a amostragem do banco de dados, que deve conter um número suficiente de observações (n), de forma a garantir a representatividade do que está sendo estudado. Ressalta-se também a relevância em fazer um levantamento detalhado das características das amostras, considerações e limitações do método de amostragem. Caso contrário, os resultados podem ser tendenciosos.

Em seguida, o tratamento dos dados por meio de tabelas e gráficos. Nesta etapa são obtidas, portanto, as medidas estatísticas de dispersão dos dados x e y para analisar a sua variabilidade, sendo essas as principais medidas estatísticas: Variância (σ^2), Desvio Padrão (σ) e Coeficiente de Variação (C_v), definidas nas Equações 2.5, 2.6 e 2.7, respectivamente.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum (i - \mu)^2 \quad (2.5)$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (2.6)$$

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} 100 \quad (2.7)$$

Onde i é a observação, μ a média das observações e n o tamanho da amostra.

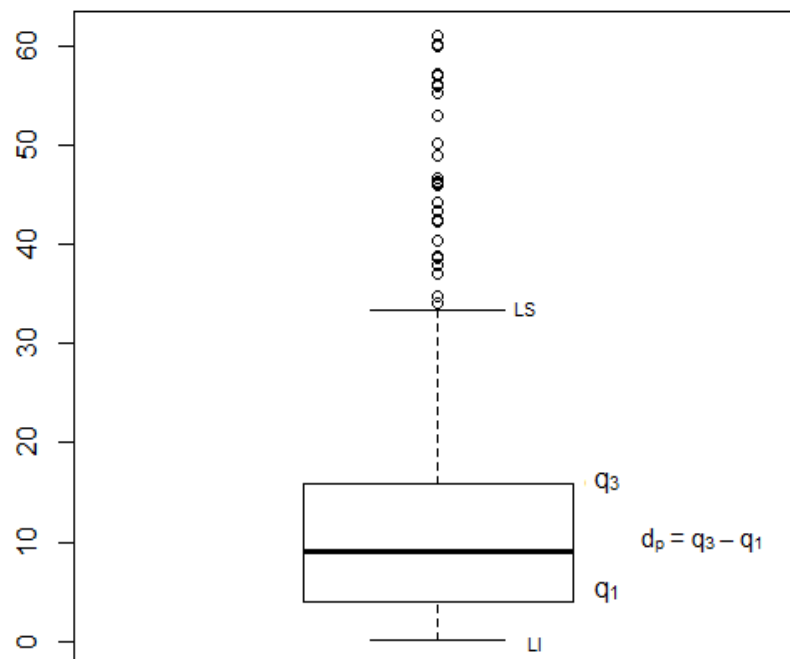
A plotagem dos dados através do diagrama do tipo *boxplot* (Figura 2.4), quando x for variável categórica, permite identificar a presença de valores atípicos às observações, ou *outliers*. Para construir este diagrama considera-se um retângulo onde são representados a mediana (q_2) e as extremidades dadas pelo quartis q_3 e q_1 . A partir do retângulo para cima e para baixo, são delimitados os limites superior

(LS) e inferior (LI), respectivamente, dados pelas Equações 2.8 e 2.9. Valores fora desses limites são chamados de pontos exteriores e podem significar erro de amostragem. Assim, a sua exclusão procura eliminar as observações infieis.

$$LS = q_3 + (1,5)d_q \quad (2.8)$$

$$LI = q_1 - (1,5)d_q \quad (2.9)$$

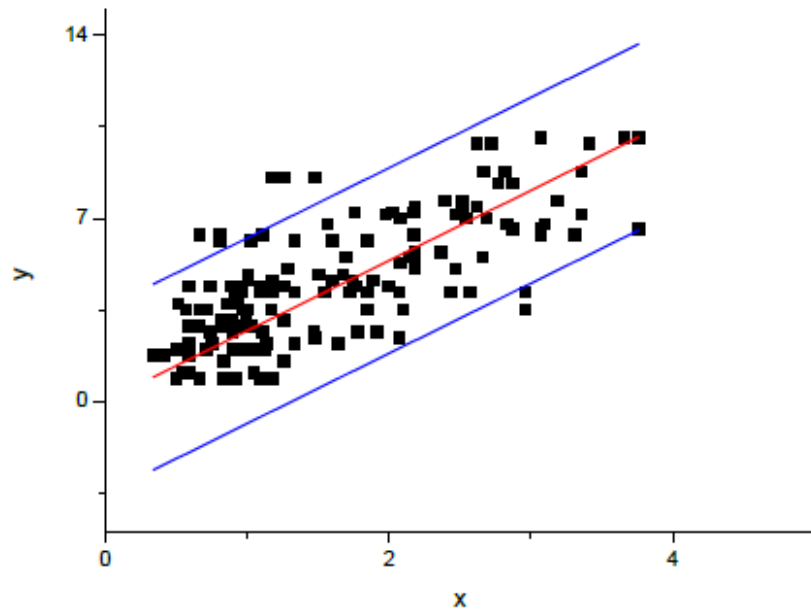
Figura 2.4 - Avaliação de outliers – *boxplot*



Fonte: Adaptado de Santos (2017).

No caso de x sendo variável contínua, os *outliers* são identificados pelo traçado de linhas inferiores e superiores no gráfico de dispersão, dadas pelo intervalo de confiança (Figura 2.5). Ou seja, os dados que estejam acima do máximo ou abaixo do mínimo são os *outliers* e sua exclusão tem como objetivo eliminar as observações infieis, que podem ser ocasionadas por erros de amostragem, por exemplo.

Figura 2.5 - Avaliação de outliers – limites superiores e inferiores no gráfico de dispersão de pares de valores.



Fonte: Santos (2017).

A verificação da existência e do grau de relação entre variáveis quantitativas é dada pelo coeficiente de correlação linear de Pearson (Equação 2.10), r , que é uma medida de associação linear que varia de -1 a 1. Se $r=0$, significa que não há associação linear entre as duas variáveis envolvidas. Quando $r= -1$ significa correlação linear negativa perfeita, enquanto que se $r= 1$ a correlação linear positiva é perfeita. Ou seja, quanto mais próximo $| r |$ for de zero, menor é a correlação linear.

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \sqrt{n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \quad (2.10)$$

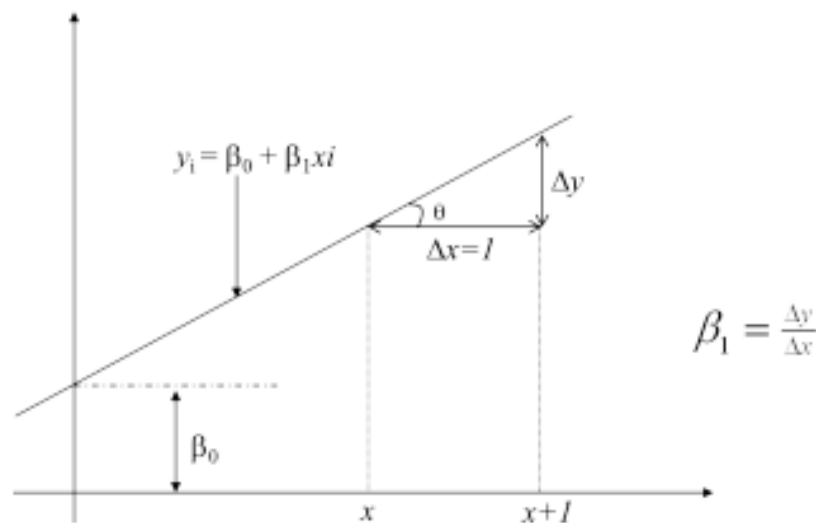
Vale lembrar que o coeficiente de correlação não determina uma relação de causa e efeito, mas sim uma medida da tendência e da força da relação linear entre as variáveis x e y . Portanto, para determinação das relações de causa e efeito devem ser utilizados os modelos de regressão.

2.4.3. Regressão Linear

Suponha que a relação verdadeira entre y e x seja uma linha reta onde a interseção (β_0) e a inclinação (β_1) são coeficientes desconhecidos da regressão. Assim, a regressão linear (Equação 2.11 e Figura 2.6) é a ferramenta mais utilizada para se correlacionar duas ou mais variáveis, onde β_0 e β_1 são parâmetros constantes de ajustes, e e_i os resíduos, responsáveis por simular as aleatoriedades que provocam variações em y (variável dependente) independentes de x (variável independente ou regressor).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e_i \quad (2.11)$$

Figura 2.6 - Regressão Linear Simples – Demonstração dos coeficientes do modelo de regressão linear.



Fonte: Montgomery e Runger (2009).

O diagrama de dispersão é um gráfico constituído por pontos onde cada ponto, P_i , representa um par de valores observados, (x_i, y_i) , (x_i representa o valor da variável independente observada para o indivíduo P_i e y_i representa o valor da variável dependente observada para esse mesmo indivíduo).

O diagrama de dispersão é obtido pelos pontos posicionados em torno da reta de regressão e tem uma função dupla: analisar se existe alguma associação entre as variáveis e permitir identificar qual o modelo matemático (equação) mais apropriado para descrever essa associação.

Quando o diagrama de dispersão indica uma tendência para uma relação linear, então os dados encontram-se bem ajustados pela reta de regressão (Equação 2.11).

Ao ajustar uma reta de regressão aos dados observados anulamos os efeitos da variável residual. Verifica-se que nem todos os pontos se encontram sobre a reta e essa diferença é o erro (e), que pode ter sido ocasionado por fatores distintos. Mas supõe-se que a média desses erros tende a anular-se, ou seja: $E(e_i) = 0$.

A obtenção da reta ajustada implica o conhecimento dos parâmetros β_0 e β_1 de tal modo que o desvio entre os valores reais e os valores ajustados seja mínimo. O Método dos Mínimos Quadrados é utilizado para estimar os parâmetros β_0 e β_1 da Equação 2.11, onde se minimiza a soma dos quadrados residual e obtêm-se os parâmetros por derivações até chegar às expressões 2.12 e 2.13, onde \bar{x} e \bar{y} são as médias amostrais de x e y , respectivamente.

$$\hat{\beta}_0 = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (2.12)$$

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i x_i - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)(\sum_{i=1}^n x_i)}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} \quad (2.13)$$

2.4.4. Avaliação do Modelo de Regressão

2.4.4.1. Testes de Hipóteses

É de fundamental importância avaliar se a correlação em questão é o modelo adequado para expressar matematicamente os dados da amostra e, consequentemente, validar ou não a correlação. Tal avaliação se dá principalmente

por meio dos testes de hipóteses, que fazem parte do ramo da estatística chamado de inferência.

A inferência estatística consiste em utilizar dados amostrais para generalizar certa condição sobre os valores dos parâmetros populacionais. Assim, em um processo de melhoria contínua, os testes de hipóteses permitem confirmar a eficácia das medidas de melhorias adotadas.

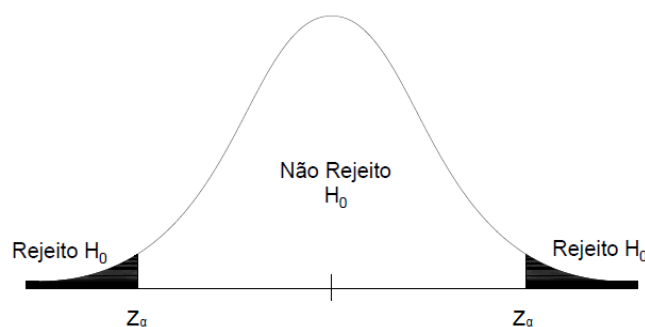
No teste de hipóteses a condição é escrita por duas hipóteses, nula e alternativa, H_0 e H_1 respectivamente, excludentes entre si. A conclusão, aceitar ou rejeitar H_0 , dependerá da comparação entre o resultado do teste e o valor crítico, formulado para cada teste de hipótese.

A região de rejeição (ou região crítica, R_C) consiste no conjunto dos valores assumidos na estatística de teste para os quais a hipótese nula é rejeitada, sendo que, dessa forma, a região de aceitação, R_A , é o seu complementar. Adicionalmente, a área da região crítica é igual ao nível de significância, dado pela Equação 2.14, que estabelece a probabilidade de rejeitar H_0 quando é verdadeira.

$$\alpha = 1 - \text{Nível de confiança} \quad (2.14)$$

Dessa forma, comumente compara-se o valor-p com o nível de significância (α) (Figura 2.7), sendo que o p-valor é definido como a probabilidade de que a estatística do teste tenha valor extremo em relação ao valor observado (estatística) quando a hipótese H_0 é verdadeira.

Figura 2.7 - Interpretação dos Testes de Hipóteses.



Fonte: adaptado de Santos (2017).

Resumindo, aceita-se H_0 caso o valor-p seja superior ao nível de significância e, caso contrário, rejeita-se H_0 e se aceita H_1 com o nível de confiança arbitrado (tradicionalmente fixado em 95%).

Segundo Santos (2017), no âmbito da regressão linear aplicam-se, com o objetivo de avaliar se os parâmetros da regressão são significativos em relação aos dados observados, o teste F, que analisa a correlação como um todo e, o teste t, que avalia os parâmetros β_0 e β_1 individualmente. Nestes casos, as hipóteses são:

H_0 : o parâmetro não é significante;

H_1 : o parâmetro é significante.

A estatística do teste F é dada pelas Equações 2.15 a 2.17, sendo SQ_R a soma quadrática da regressão e SQ_E a soma quadrática do erro.

$$F_0 = \frac{MQ_R}{MQ_E} \quad (2.15)$$

$$MQ_R = \frac{SQ_R}{k} \quad (2.16)$$

$$MQ_E = \frac{SQ_E}{n-p} \quad (2.17)$$

Já a estatística do teste t é dada pela Equação 2.18, sendo C_{jj} o elemento da diagonal de $(\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-1}$, correspondendo a $\hat{\beta}_j$.

$$T_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} \quad (2.18)$$

2.4.4.2. Coeficiente de Determinação - R^2

O coeficiente de determinação (R^2), obtido elevando-se o coeficiente de correlação de Pearson ao quadrado, consiste numa medida comumente utilizada para julgar a adequação de um modelo de regressão. Frequentemente, R^2 refere-se à quantidade da variabilidade dos dados, explicada ou considerada pelo modelo de

regressão. Ou seja, este coeficiente mede a fração da variabilidade das observações y pela aplicação da equação em novos valores de x , portanto, pode variar de 0 a 1,0.

Dessa forma, quanto mais próximo de 1,0 estiver o coeficiente de determinação, melhor será o grau de explicação da variação de y em termos da variável x . Apesar de não haver um consenso quanto à classificação da correlação de dados a partir do valor do coeficiente de determinação, a tabela 2.3 apresenta a proposta de Jarushi *et al.* (2015) para interpretação deste coeficiente.

Tabela 2.3 - Classificação da correlação dos dados a partir do coeficiente de determinação.

Coeficiente R^2	Classificação
1,0	Perfeito
0,7-0,9	Forte
0,4-0,6	Moderado
0,1-0,3	Baixo
0	Sem correlação

Fonte: Jarushi *et al.* (2015).

Vale ressaltar que R^2 não expressa necessariamente a credibilidade da correlação obtida e, portanto, não basta avaliar este parâmetro, uma vez que relações não lineares podem eventualmente gerar valores relativamente altos para o coeficiente.

2.4.4.3. Avaliação de Resíduos

Além dos testes descritos anteriormente, a validação da correlação encontrada depende da análise dos resíduos, ou seja, avaliação dos erros de ajuste do modelo.

Os resíduos de um modelo de regressão são $e_i = y_i - \hat{y}_i$, $i = 1, 2, \dots, n$, sendo que y_i é uma observação real e \hat{y}_i é o valor ajustado correspondente, a partir do modelo de regressão.

Segundo Montgomery e Runger (2009), ajustar um modelo de regressão requer várias suposições, dentre elas, que os resíduos são independentes e possuem

distribuição de forma aproximadamente normal, ou seja, com média zero e variância constante (homoscedasticidade).

As técnicas utilizadas para verificação das suposições acima podem ser gráficas ou através de testes. No entanto, o ideal é que as técnicas sejam combinadas, pois, como as análises gráficas são visuais, podem ser subjetivas. Já os testes são mais indicados para tomada de decisão.

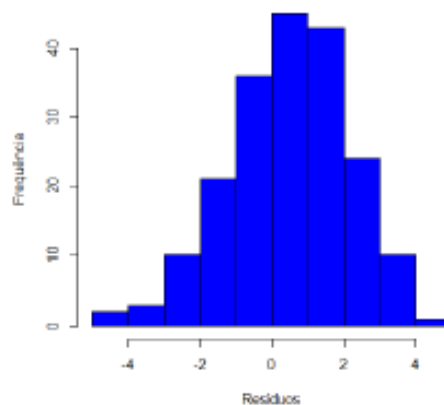
2.4.4.3.1. Diagnóstico de Normalidade

Análise gráfica:

De forma a verificar a normalidade são utilizados os métodos gráficos histograma de frequência dos resíduos ou gráficos de Probabilidade Normal dos Resíduos.

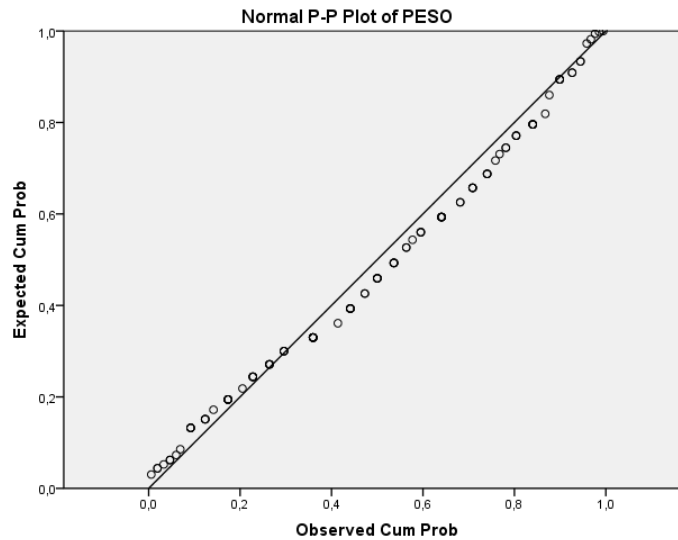
No histograma, o gráfico deve ser apresentado em formato de sino e simétrico conforme Figura 2.8. No entanto, este gráfico deve ser utilizado em casos com grande quantidade de amostras, uma vez que quando se trabalha com amostras reduzidas o histograma não é muito conclusivo.

Figura 2.8 - Exemplo de Histograma



Fonte: Santos (2017).

No gráfico de Probabilidade Normal plota-se os valores observados contra os valores esperados. Caso o ajuste seja o modelo normal, este gráfico se apresenta como uma reta se aproximando de uma diagonal (Figura 2.9).

Figura 2.9 - Exemplo de Gráfico de Probabilidade Normal.

Fonte: Rodrigues (2012).

Teste de Kolmogorov-Smirnov (KS):

Este teste é utilizado para observar a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida pelos dados, neste caso da distribuição normal, comparando-se esta diferença com um valor crítico, com $1-\alpha$ de confiança, por meio das hipóteses:

H_0 : a distribuição é normal ($D_{KS} < D'_{KS}$);

H_1 : a distribuição não é normal ($D_{KS} > D'_{KS}$).

Onde D_{KS} é o resultado do teste e D'_{KS} é o valor crítico. A estatística do teste, D_{KS} , dada pela Equação 2.19, mede as distâncias verticais entre os gráficos das funções teórica e empírica, $F(x)$ e $F_n(x)$, respectivamente. O D'_{KS} encontra-se na tabela do Anexo I deste trabalho.

$$D_{KS} = \max |F(x) - F_n(x)| \quad (2.19)$$

O valor de $F_n(x)$ é dado pela razão entre a posição i do dado e o valor total de dados, n . Já o valor de $F(x)$ é obtido na tabela da distribuição normal padrão em termos de $Z_{(i)}$, dado pela equação 2.20, onde s é o desvio padrão.

$$Z_{(i)} = \frac{x_{(i)} - \bar{x}}{s} \quad (2.20)$$

Teste de Shapiro-Wilk (SW):

O teste SW é dado por meio das hipóteses:

H_0 : a distribuição é normal ($D_{SW} > D'_{SW}$);

H_1 : a distribuição não é normal ($D_{SW} < D'_{SW}$).

A estatística do teste (D_{SW}) é dada pela Equação 2.21, onde $a_{(i)}$ são constantes geradas a partir das médias, variâncias e covariâncias de n ordens, cujos valores são tabelados e estão disponíveis no anexo I deste trabalho, bem como os valores críticos do teste (D'_{SW}).

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.21)$$

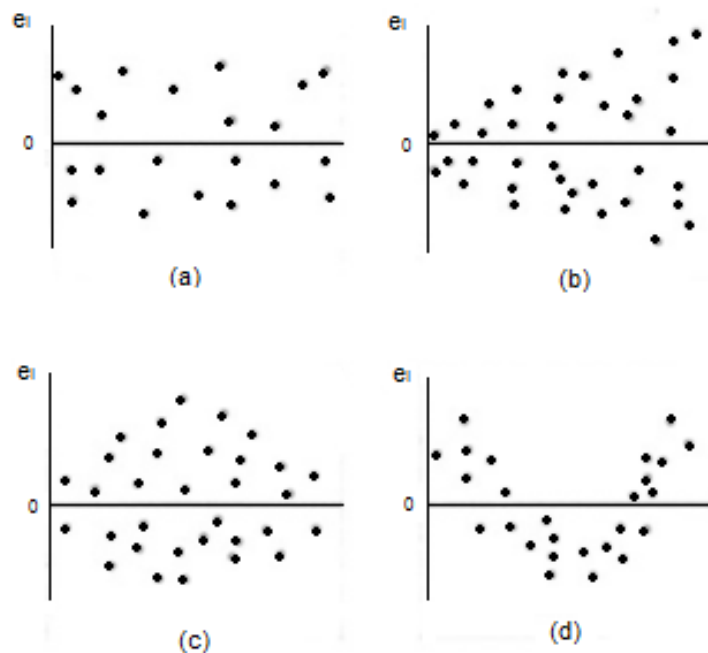
Segundo Rodrigues (2012), este teste é preferível em relação ao teste KS nos casos de amostras de pequenas dimensões ($n < 30$). Já NBR 10538:1988 (Interpretação Estatística de Dados – Testes de Normalidade) recomenda não utilizar o teste SW nos casos em que ($n < 8$).

Ressalta-se que, assim como para os demais testes, é mais usual a comparação do valor-p com o nível de significância.

2.4.4.3.2. Diagnóstico de Homocedasticidade

Geralmente é útil plotar os resíduos *versus* valores preditos \hat{y} e contra a variável independente x . Nesses casos, os gráficos normalmente apresentam comportamento semelhante a um dos quatro padrões mostrados na Figura 2.10. Montgomery e Runger (2009) explicam que o padrão (a) representa a situação ideal, já os demais padrões representam anomalias ou indica que o modelo não é adequado.

Figura 2.10 - Padrões de comportamento para gráficos dos resíduos. (a) satisfatório, (b) funil, (c) arco duplo, (d) não linear.



Fonte: adaptado de Montgomery e Runger (2009)

Diante dos modelos de comportamento apresentados na Figura 2.10, nota-se que é desejável que os dados se comportem em uma faixa horizontal de baixa amplitude (conforme Figura 2.10a). Já a observância dos dados nos demais formatos apresentados evidencia a heterocedasticidade (variância não constante) do modelo. Além disso, é possível avaliar a independência dos resíduos nos modelos *b*, *c* e *d*, uma vez que caso os erros estejam distribuídos de forma a parecer que existe uma tendência (por exemplo, linear ou parabólica), há indícios de dependência entre os resíduos.

Além de diagnosticar heteroscedasticidade, o gráfico de resíduos *versus* valores ajustados também auxilia na detecção de pontos atípicos, ou *outliers*.

Assim, se um *outlier* for influente, ele pode interferir na função de regressão. Se os resíduos tem distribuição normal, então aproximadamente 95% dos resíduos padronizados devem estar no intervalo de (-2,2).

2.4.4.3.3. Diagnóstico de independência

Durbin-Watson (DW):

Este teste é utilizado para avaliar a dependência sequencial entre os erros, ou seja, testa se a magnitude de um resíduo e_i influencia na magnitude do resíduo e_{i+1} , por meio das hipóteses:

H_0 : não existe autocorrelação dos resíduos

H_1 : existe autocorrelação dos resíduos

$$d = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (2.22)$$

A estatística do teste é dada pela equação 2.22, onde $0 \leq dw \leq 4$. A decisão a ser tomada, em função dos valores críticos, d_L e d_U , da Tabela de Durbin-Watson (Anexo I), é dada pela Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Tabela de decisão em função de d_U e d_L .

Zona de Rejeição e de não-rejeição de H_0					
dw	$[0; d_L[$	$[d_L; d_U[$	$[d_U; 4 - d_U[$	$[4 - d_U; 4 - d_L[$	$[4 - d_L; 4]$
Decisão	Rejeitar H_0	Nada se pode concluir	Não rejeitar H_0	Nada se pode concluir	Rejeitar H_0
	Auto-correlação positiva		Os resíduos são independentes		Auto-correlação negativa

Fonte: Rodrigues (2012)

2.5. COMPARAÇÕES E CORRELAÇÕES ENTRE OS MÉTODOS DE CONE E DE PERCUSSÃO

2.5.1. Considerações iniciais

Os dois métodos, Casagrande e cone de penetração, são usados para determinar o limite de liquidez dos solos. Embora o método de penetração do cone tenha sido

aceito como o método padrão em muitos países, por exemplo, Reino Unido, Índia e Canadá, o método de Casagrande ainda é amplamente utilizado. British Standards (BS 1377: Parte 2, 1990) estabelecem o método de penetração de cone como o método "definitivo" e o método de Casagrande como um método "alternativo". No entanto, a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM D 4318-2000) recomenda o método de Casagrande. A diferença importante é que o aparelho de Casagrande definido na BS 1377: Parte 2 (1990) tem uma base relativamente mais macia do que o definido na norma ASTM (D 4318-2000). Na prática, ambos os tipos de aparelho de Casagrande são usados em engenharia geotécnica em diferentes partes do mundo (Ozer, 2009).

Muitos pesquisadores (Budhu, 1985; Sivapullaiah e Sridharan, 1985; Wasti e Bezirci, 1986; Christaras, 1991; Sridharan e Prakash, 2000; Dragoni et al., 2008; Ozer, 2009) observaram que os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e de cone não são idênticos. Para solos de menor plasticidade, o método de cone dá um valor mais elevado em comparação com o método do Casagrande, ao passo que, para o solos de maior plasticidade, o método da Casagrande apresenta valores mais elevados.

De acordo com Sampson e Netterberg (1985), Wasti Bezirci (1986), Leroeuil Le Bihan (1996) e Sridharan e Prakash (2000), para argilas com LL superior a 60-70%, o método de percussão dá valores muito mais elevados do que o método de cone. Assim a introdução de valores LL_p no Sistema de classificação atual do solos pode afetar a utilização de materiais em engenharia geotécnica, em alguns casos aumentando o custo para eliminação e / ou melhoria do solo.

Sridharan e Prakash (2000) afirmaram que a resistência de um solo no limite de liquidez é constituída por dois componentes: a resistência ao cisalhamento viscoso e resistência ao cisalhamento de atrito. O limite de liquidez obtido pelo método de Casagrande é predominantemente uma medida da resistência ao cisalhamento viscoso e, para o método de cone, é uma medida predominantemente de resistência ao cisalhamento por atrito. Como a natureza viscosa da água de dupla camada é responsável pelo cisalhamento viscoso e o limite de liquidez das montmorilonitas é devido à água de camada dupla, o método de Casagrande é bem adequado para solos formados por montmorilonitas (Sridharan e Prakash 2000).

Com base nesta hipótese pode-se explicar, em geral, que LL_c é maior que LL_p para as montmorilonitas e que LL_p é maior que LL_c para as caulinitas. Isto foi validado por Nagaraj et al. (2012) ao investigar os resultados da literatura (Queiroz de Carvalho, 1986) e da sua investigação experimental.

Assim, foi sugerido por Sridharan e Prakash (1999) e Nagaraj et al. (2012) que o método de determinação de LL_p deve ser preferido para caulinitas e o método de determinação de LL_c para montmorilonitas. A diferença observada por Nagaraj et al. (2012) entre os limites de liquidez obtidos pelos dois métodos foi atribuída ao tipo de mineral de argila e sua proporção no conteúdo de argila, e não ao teor de argila sozinho. Assim, o tipo de mineral argílico e sua proporção no teor de argila são fatores decisivos para determinação de qual dos dois métodos dá maior valor de LL.

Mishra et al. (2012) avaliaram o efeito das propriedades físicas e mineralógicas das bentonitas sobre o valor de limite de liquidez de misturas solo-bentonitas, pelos métodos de percussão e penetração. Observou-se menor diferença entre os dois métodos para as misturas com menores valores de LL, ou seja, para a amostra com LL menor que 116%, os pesquisadores verificaram que os valores de LL_c e LL_p foram muito próximos. Para as amostras com LL maior do que 116% LL_c foi maior que LL_p . Além disso, os resultados dos ensaios mostraram que a diferença entre LL_c e LL_p das misturas de solo-bentonita aumentou com o aumento do percentual da fração de argila bentonita presente na mistura. Um comportamento semelhante foi observado por Sivapullaiah e Sridharan (1985) para as misturas de solo e bentonita em diferentes proporções. À medida que as misturas com alto teor de argila são mais susceptíveis a serem afetadas pelos efeitos viscoelásticos, o valor de LL_p é maior do que LL_c (Budhu, 1985). Da mesma forma, os resultados mostraram que a diferença entre LL_c e LL_p das misturas de solo-bentonita aumentou com o aumento da área de superfície específica da bentonita presente na mistura (Mishra et al., 2012).

Sivapullaiah e Sridharan (1985) observaram também que o valor de LL de misturas de solos não é equivalente à soma dos valores de LL desses solos componentes depois de corrigi-los aos seus respectivos percentuais nas misturas. Ou seja, a lei linear não é válida, mesmo no caso de misturas de areia e argila. Além disso, os pesquisadores observaram que o desvio da lei linear é maior para misturas de

argilas do que para misturas de argila e areia, indicando maior interação em misturas de argilas. Isso leva à conclusão de que o limite de liquidez não é inteiramente uma propriedade física.

Wasti (1987) avaliou solos naturais e misturas de bentonita com solos naturais e observou que os valores de limite de liquidez e plasticidade determinados pelo método de cone concordam bem para solos com LL até cerca de 120%. Para solos com LL mais elevados, os valores de LL_p foram menores e essa diferença era maior para maiores valores de LL.

Christaras (1991) comparou resultados de LL_c e LL_p para argilas puras e para solos com diversas granulometrias. Foi observado pelo pesquisador que a semelhança entre os resultados pelos dois métodos é maior para maiores valores de LL. Para efeitos de comparação, a relação LL_p / LL_c foi relacionada com LL_m (média valor dos dois métodos). No caso de similaridade completa esta proporção seria igual a 1. O pesquisador verificou ainda que o tamanho dos grãos é o principal fator responsável pela diversidade entre os resultados obtidos pelos dois métodos. O tamanho do grão afeta a relação entre LL_p / LL_c e a profundidade de penetração do cone, de forma não linear, o que sugere que a taxa de variação de LL_p / LL_c e a profundidade de penetração do cone com a percentagem de argila não é constante, mas varia com o percentual de argila. Assim, para solos com mais de 30% de argila, a taxa LL_p / LL_c é praticamente igual a 1, e uma profundidade de penetração de 10 milímetros corresponde ao limite de liquidez de Casagrande. Para solos com teor de argila menor, a taxa de diferença entre os dois métodos aumenta. Assim, Christaras (1991) considerou que para maiores teores de finos no solo, maior seria a semelhança entre os valores de LL_c e LL_p . A diminuição na quantidade de partículas finas em um solo provoca uma redução proporcional nos resultados de LL e apresenta valores de LL_p mais elevados. Uma profundidade de penetração do cone inferior a 10 mm poderia resultar em valores de LL_p semelhantes aos valores de LL_c , para siltes e areias siltosas. Esta profundidade de penetração (z) pode ser determinada de acordo com a relação calculada na Equação 2.23.

$$z = 6C^{0,14} \quad (2.23)$$

Di Matteo (2012) comparou os valores de LL_c (bases dura e macia) com os valores de LL_p (cone britânico). O pesquisador comparou resultados de LL_c e LL_p de 100 amostras, com LL variando entre 20 e 50%, sendo: 6 resultados experimentais

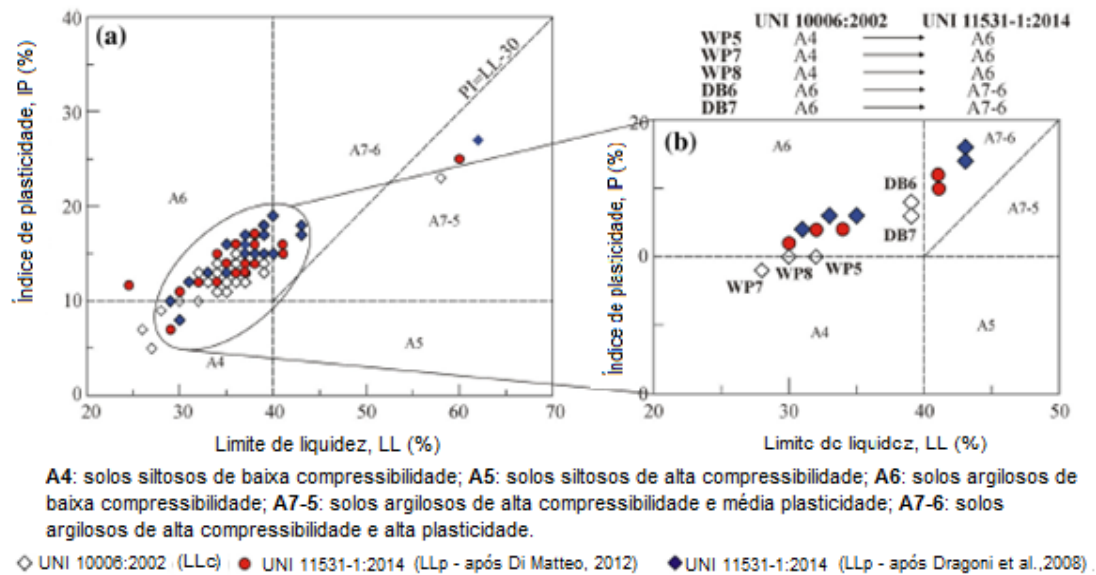
realizados pelo pesquisador em misturas de areia fina e silte e um banco de dados de 94 solos naturais publicados na literatura por Campbell (1975), Belviso et al. (1985), e Wasti Bezirci (1986), Dragoni et al. (2008), Fojtová et al. (2009), Ozer (2009) e Zentar et al. (2009). A correlação entre LL_c e LL_p obtida por Di Matteo (2012) pode ser considerada, de forma geral, de aplicabilidade para a maioria dos solos de baixa a média plasticidade. Di Matteo (2012) observou que LL_p é sempre superior LL_c , pelo menos para o intervalo de LL investigado. A diferença máxima de 5% pontos foi observada entre as duas técnicas (dados de Belviso et al. 1985) e cerca de 72% das amostras mostrou uma diferença variando entre 1,7 e 3,4% pontos.

Posteriormente, Quintela et al. (2014) determinaram os valores de LL_c e LL_p de 17 amostras do interior de Portugal e arquipélagos, cujos minerais de argila mais proeminentes são caulinita, illita e esmectita. A comparação entre os dados obtidos por Quintela et al. (2014) com a equação proposta por Di Matteo (2012) foi efetuada e, embora o estudo Di Matteo (2012) tenha sido realizado com os dados de amostras com valores LL entre 20 e 50% e, portanto, muito mais baixo do que aqueles obtidos no estudo de Quintela et al. (2014), os pesquisadores concluíram que a equação para a estimativa de LL parece confiável, para uma ampla gama de tipos de solo argiloso.

Di Matteo et al. (2016) avaliaram os dados de 28 amostras de duas obras de terra realizadas em dois locais perto do Lago Trasimeno (Itália central), onde foram discutidas as consequências da aplicação do valor de LL_p em vez do valor de LL_c , quanto à classificação dos solos e seus efeitos na seleção para as obras de engenharia. O estudo foi motivado pelo fato de que o novo padrão Europeu (UNI 11531-1: 2014), que estabelece o método de determinação de LL_p , substituiu o padrão (UNI 10006: 2002) que estabelece o método de determinação de LL_c . Assim, todas as amostras foram adequadas para os trabalhos planejados de acordo com o padrão antigo. No entanto, os pesquisadores chegaram à conclusão de que 18% das amostras tornaram-se inadequadas quando se considera o padrão novo. Ou seja, o fato da suspeita de que a classificação antiga possa ser insegura torna-se preocupante, ou ainda, que o novo padrão (baseado em LL_p) restringe a escolha dos materiais aumentando consideravelmente os custos com as obras de terra.

Os limites de Atterberg e as distribuições de tamanho de grão são comumente utilizados para classificar os solos com características específicas de acordo com ASTM D3282-08 e AASHTO M145-82. Os valores medidos para o limite de liquidez e limite de plasticidade dos solos são amplamente utilizados como parâmetros, que podem ser correlacionados empiricamente contra muitas propriedades do solo. Conforme relatado por Dragoni et al. (2008) e Di Matteo (2012), solos fluviais-lacustres da tália Central mostram valores de LL_p de 2,2-2,8 pontos superiores ao LL_c , no intervalo de LL_c 20 a 74%. Como os valores de LP ainda são obtidos com o método de rolamento um aumento geral dos valores de IP inevitavelmente ocorre quando o LL_p é usado. Assim, Di Matteo et al. (2016) exemplificaram que, assumindo que um determinado solo com teor de finos superior a 35% tenha seguintes parâmetros de índice: $LL_c = 39$, $LL_p = 42$ e $LP = 26$. Se o solo for classificado de acordo com UNI 10006: 2002 (que considera LL_c), a amostra pertence ao grupo A6, ou seja, adequada para construção leve; se a amostra for classificada de acordo com UNI 11531-1: 2014 (que considera LL_p), pertence ao grupo A7-6 e o solo tem suas propriedades geotécnicas reduzidas, tornando-se inadequado para o tipo de obra. Nesse sentido, a Figura 2.11 mostra que a classificação de dois solos usados para construir a bacia de retenção (DB6 e DB7) passou do grupo A6 para o grupo A7-6 (argilas com alta compressibilidade e alta expansão / retração. Três solos utilizados para preencher o gasoduto passaram do grupo A4 ao grupo A6 (WP5, WP7, WP8).

Figura 2.11 - (a) Classificação dos solos de acordo com UNI 10006:2002 e UNI 11531-1:2014; (b) detalhe dos solos com a classificação alterada.



Fonte: Di Matteo et al. (2016)

2.5.2. Correlações previamente publicadas entre LL_c e LL_p

Várias correlações empíricas entre os métodos do Cone e de Casagrande para determinar LL foram publicadas na literatura. Estas funções podem ser escritas através das Equações 2.24 a 2.26.

$$LL_p = A \cdot LL_c + B \quad (2.24)$$

$$LL_c = A^* \cdot LL_p - B^* \quad (2.25)$$

$$LL_c = \beta \cdot LL_p^\lambda \quad (2.26)$$

onde LL_p é o LL determinado pelo método do Cone e LL_c o LL determinado pelo método de Casagrande, A , B e A^* , B^* são constantes de ajuste obtidas através da correlação linear (Bicalho et al., 2014) e β e λ são constantes de ajuste obtidas através da correlação não linear.

Conforme relatado por Dragoni et al. (2008), a qualidade das correlações publicadas diminui para valores de LL superiores a 50% (isto é, dispersão aumenta). A relação proposta por Fojtová et al. (2009) foi derivada de solos com valores LL inferiores a

50%. Infelizmente, o estudo não dá qualquer informação sobre a distribuição granulométrica ou o índice de plasticidade, os quais são úteis para classificação de solos. Conforme relatado por Sridharan e Prakash (1998), o tipo argila mineral dominante e sua proporção no teor de argila são responsáveis pelos desvios entre os resultados de LL_c e LL_p , em vez de o conteúdo de argila por si só, tal como proposto por Budhu (1985).

Na Tabela 2.5 são apresentadas de maneira geral as correlações previamente publicadas na literatura para argilas de diferentes mineralogias e plasticidades e diferentes métodos para determinação de LL_c (base dura e base macia) e LL_p (cones britânico e sueco, por exemplo).

Nas Tabelas 2.6 e 2.7 são apresentadas as correlações publicadas agrupadas por tipo de aparelho de Casagrande, ou seja, bases macia e dura, respectivamente. Nas Tabelas 2.8 e 2.9 são apresentadas as correlações agrupadas por tipo de cone britânico e sueco, respectivamente.

Tabela 2.5 - Correlações publicadas entre LL_c e LL_p . São informadas as variações de LL para cada correlação definida.

Referências	Correlação	Variação de LL_c (%)
(Belviso et al. (1985)	$LL_p = 0,97 LL_c + 1,19$	34-134
Budhu (1985)	$LL_p = 0,935 LL_c + 4,02$	20-100
Sivapullaiah e Sridharan (1985)	$LL_p = 0,671 LL_c + 15,46$	5-500
Queiroz de Carvalho (1986)	$LL_c = 0,934 LL_p - 2,18$	13-48
Wasti e Bezirci (1986)	$LL_p = 1,01 LL_c + 4,92$	27-110
Wasti (1987)	$LL_p = 0,587 LL_c + 32,32$	145-526
Christaras (1991)	$LL_p = 0,87 LL_c + 7,93$	30-60
Leroueil e Le Bihan (1996)	$LL_p = 0,86 LL_c + 6,34$	30-74
Sridharan e Prakash (1998)	$LL_c = 1,209 LL_p - 10,8$	29-92
Sridharan e Prakash (2000)	$LL_c = 1,214 LL_p - 9,95$	33-92
Dragoni et al. (2008)	$LL_p = 1,02 LL_c + 2,87$	28-74
Fojtová et al. (2009)	$LL_p = 1,00 LL_c + 2,44$	20-50
Ozer (2009)	$LL_p = 0,90 LL_c + 6,04$	29-104
Sousa (2011)	$LL_c = 0,707 LL_p + 7,124$	38-40
Sousa (2011)	$LL_c = 0,906 LL_p + 1,119$	42-45
Gronbech et al. (2011)	$LL_p = 0,95 LL_c + 9,4$	100-340
Spagnoli (2012)	$LL_p = 0,99 LL_c + 1,05$	20-61
Mishra et al. (2012)	$LL_p = 0,8418 LL_c + 11,686$	70-150

Di Matteo (2012)	$LL_p = 1,00 LL_c + 2,2$	20-50
Bicalho et al. (2017)	$LL_c = 1,00. LL_p - 2,7$	14-100
Bicalho et al. (2017)	$LL_c = 1,11. LL_p + 10,0$	>100
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,69. LL_p^{1,09}$	<120
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,53. LL_p^{1,18}$	<600
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,62 . LL_p^{1,14}$	<120
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,54 . LL_p^{1,19}$	<600

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

Tabela 2.6 - Correlações publicadas entre LL_c e LL_p definidas para base macia do aparelho de Casagrande.

Referências	Correlação	Variação de LL_c (%)
Budhu (1985)	$LL_p = 0,935 LL_c + 4,02$	20-100
Queiroz de Carvalho (1986)	$LL_c = 0,934 LL_p - 2,18$	13-48
Sridharan & Prakash (1998)	$LL_c = 1,209 LL_p - 10,8$	29-92
Sridharan & Prakash (2000)	$LL_c = 1,214 LL_p - 9,95$	33-92
Sousa (2011)	$LL_c = 0,707 LL_p + 7,124$	38-40
Sousa (2011)	$LL_c = 0,906 LL_p + 1,119$	42-45
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,62 . LL_p^{1,14}$	<120
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,54 . LL_p^{1,19}$	<600

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

Tabela 2.7 - Correlações publicadas entre LL_c e LL_p definidas para base dura do aparelho de Casagrande.

Referências	Correlação	Variação de LL_c (%)
Belviso et al. (1985)	$LL_p = 0,97 LL_c + 1,19$	34-134
Wasti (1987)	$LL_p = 1,01 LL_c + 4,92$	27-110
Wasti (1987)	$LL_p = 0,587 LL_c + 32,32$	145-526
Christaras (1991)	$LL_p = 0,87 LL_c + 7,93$	30-60
Dragoni et al. (2008)	$LL_p = 1,02 LL_c + 2,87$	28-74
Fojtová et al. (2009)	$LL_p = 1,00 LL_c + 2,44$	20-50
Ozer (2009)	$LL_p = 0,90 LL_c + 6,04$	29-104
Di Matteo (2012)	$LL_p = 1,00 LL_c + 2,2$	20-50
Mishra et al. (2012)	$LL_p = 0,8418 LL_c + 11,686$	70-150
Spagnoli (2012)	$LL_p = 0,99 LL_c + 1,05$	20-61
Bicalho et al. (2017)	$LL_c = 1,11. LL_p + 10,0$	>100
Bicalho et al. (2017)	$LL_c = 1,00. LL_p - 2,7$	14-100
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,69. LL_p^{1,09}$	<120
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,53. LL_p^{1,18}$	<600

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

Tabela 2.8 - Correlações publicadas entre LL_c e LL_p definidas para cone britânico (ângulo de 30 graus e peso de 80 g).

Referências	Correlação	Variação de LL_c (%)
Belviso et al. (1985)	$LL_p = 0,97 LL_c + 1,19$	34-134
Budhu (1985)	$LL_p = 0,935 LL_c + 4,02$	20-100

Queiroz de Carvalho (1986)	$LL_c = 0,934 LL_p - 2,18$	13-48
Wasti (1987)	$LL_p = 1,01 LL_c + 4,92$	27-110
Wasti (1987)	$LL_p = 0,587 LL_c + 32,32$	145-526
Sridharan & Prakash (1998)	$LL_c = 1,209 LL_p - 10,8$	29-92
Sridharan & Prakash (2000)	$LL_c = 1,214 LL_p - 9,95$	33-92
Ozer (2009)	$LL_p = 0,90 LL_c + 6,04$	29-104
Fojtová et al. (2009)	$LL_p = 1,00 LL_c + 2,44$	20-50
Sousa (2011)	$LL_c = 0,707 LL_p + 7,124$	38-40
Sousa (2011)	$LL_c = 0,906 LL_p + 1,119$	42-45
Di Matteo (2012)	$LL_p = 1,00 LL_c + 2,2$	20-50
Spagnoli (2012)	$LL_p = 0,99 LL_c + 1,05$	20-61
Mishra et al. (2012)	$LL_p = 0,8418 LL_c + 11,686$	70-150
Bicalho et al. (2017)	$LL_c = 1,00. LL_p - 2,7$	14-100
Bicalho et al. (2017)	$LL_c = 1,11. LL_p + 10,0$	>100
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,69. LL_p^{1,09}$	<120
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,53. LL_p^{1,18}$	<600
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,62 . LL_p^{1,14}$	<120
Kelly et al. (2017)	$LL_c = 0,54 . LL_p^{1,19}$	<600

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

Tabela 2.9 - Correlações publicadas entre LL_c e LL_p definidas para cone sueco (ângulo de cone de 60 graus e 60 g de peso).

Referências	Correlação	Variação de LL_c (%)
Christaras (1991)	$LL_p = 0,87 LL_c + 7,93$	30-60
Gronbech et al. (2011)	$LL_p = 0,95 LL_c + 9,4$	100-340

Fonte: Dados da Pesquisa (2017).

2.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO 2

Inicialmente na revisão bibliográfica foram apresentadas as principais características e limitações dos métodos de percussão e de penetração para determinação do limite de liquidez de solos argilosos. Conclui-se que tanto o método para determinação de LL_c quanto o método para determinação de LL_p são largamente utilizados no mundo. O método de cone, ou seja, para determinação de LL_p , apesar de suas limitações é mais confiável que o método de percussão, principalmente por apresentar menor influência da técnica do operador.

As correlações publicadas entre LL_c e LL_p são as mais numerosas para aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico, sendo mais comum o uso de regressão

linear simples. No entanto, em muitos estudos não foram especificadas as características de mineralogia dos solos investigados, fator que, conforme abordado nesta revisão bibliográfica, influencia diretamente nas correlações entre LL_c e LL_p . Finalmente, foram abordados os principais aspectos da regressão linear, ferramenta para a elaboração de correlações entre variáveis. Das correlações apresentadas neste capítulo que utilizam essa ferramenta, o coeficiente de determinação (R^2) é o parâmetro mais utilizado dentre os pesquisadores para se avaliar a qualidade da correlação. No entanto, destaca-se a importância de se investigar se os resíduos são independentes e se podem ser descritos com distribuição normal (média zero e variância constante), por ser a hipótese básica do MQO. Essa avaliação não foi verificada na maioria dos trabalhos de pesquisa aqui apresentados. Sugere-se, portanto, que os resíduos sejam analisados segundo os testes de aderência de Kolmogorov-Smirnov (KS) ou Shapiro Wilk (SW) e Durbin-Watson (DW) ao ser proposta uma correlação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

No presente trabalho foram avaliadas correlações entre os valores de limite de liquidez obtidos pelos métodos de determinação de LL_c e LL_p . Para tal, foram verificadas as variáveis do ensaio, tais como dureza da base da concha e ângulo do cone, que possuem especificações diversas de acordo com cada norma.

Foi realizado o levantamento do banco de dados, onde os dados foram agrupados de acordo com as características do aparelho, bem como com a mineralogia e a faixa de plasticidade do solo, conforme descrito capítulo 4 deste trabalho.

Vale ressaltar que os dados coletados das publicações, quando não apresentados os resultados em forma de tabela, foram retirados com auxílio do programa DataThief. Esse programa é utilizado para extrair as coordenadas de pontos apresentados em gráficos, a partir da definição dos eixos e dos pontos pelo usuário.

Após padronização e agrupamento do banco de dados, detalhado no capítulo 4, foram definidas as regressões lineares para cada grupo e, em seguida, para validar as correlações encontradas, os resíduos foram avaliados através das análises gráficas e dos testes, conforme descritos no item 2.4.4.3 deste trabalho, para a

significância de 5%. Uma vez que o teste SW é recomendável sua aplicação em amostras pequenas (até 30 dados), este método para verificação da normalidade dos resíduos foi utilizado neste trabalho apenas nos grupos de dados que possuem tamanho correspondente.

O coeficiente de correlação, R , não faz parte da rotina usual de análise de regressão e, portanto, não foi utilizado na análise.

Já o coeficiente de determinação, R^2 , foi utilizado por ser frequentemente aplicado em pesquisas. No entanto, conforme mencionado no item 2.4.4.2 deste trabalho, este coeficiente não expressa necessariamente a credibilidade da correlação obtida e, portanto, não foi utilizado como parâmetro para tomada de decisão de rejeição ou aceitação da correlação.

Os métodos estatísticos descritos no item 2.4 deste trabalho foram aplicados através de ferramentas computacionais: *Microsoft Excel* e, principalmente, o Programa-R, sendo este mais confiável, gratuito e possui uma grande disponibilidade de pacotes estatísticos.

R é uma linguagem de programação de computadores, utilizada para manipulação de dados estatísticos e gráficos, amplamente difundida para o desenvolvimento de software estatístico e análise de dados. A rotina utilizada no Programa-R nesta pesquisa encontra-se no Apêndice A.

Para análise dos resultados é apresentado o passo-a-passo, de forma resumida, conforme metodologia descrita que será seguida nos próximos capítulos, conforme descrição a seguir:

- a) Identificação e padronização do grupo de dados e os sub-grupos de dados – apresentado no capítulo 4;
- b) Para cada sub-grupo de dados define-se o modelo de regressão linear simples;
- c) Avaliação da regressão – R^2 e Testes t e F ;
- d) Avaliação dos resíduos da regressão – Normalidade (análise gráfica e testes SW ou KS), Homocedasticidade (análise gráfica) e Independência (análise gráfica e teste DW);
- e) Aceitação ou não da correlação determinada.

4. DESCRIÇÃO DOS DADOS UTILIZADOS NA PESQUISA

4.1. INTRODUÇÃO

Nesta dissertação foi realizada ampla pesquisa dos trabalhos já publicados sobre comparações entre resultados de ensaios entre LL_c e LL_p . Conforme mencionado anteriormente, os dados foram analisados e padronizados. Foram adotados apenas os resultados cujas pesquisas especificaram a dureza da base do aparelho de Casagrande, bem como o tipo de cone utilizado, para investigar a influência da dureza da base do aparelho de Casagrande nas correlações entre LL_c e LL_p . Conforme discutido no item 2.2 deste trabalho, foi observado por Ozer (2009) e Haigh (2015) que os limites de liquidez determinados pela base macia no aparelho de Casagrande foram até 5% mais elevados do que os obtidos pela base dura.

Os trabalhos que não continham tais informações os resultados foram descartados pois, a partir dessa caracterização, é importante padronizar os dados de forma a garantir a confiabilidade e a aplicabilidade das correlações propostas. Também foi investigada a influência da mineralogia do solo ensaiado nas correlações entre LL_c e LL_p .

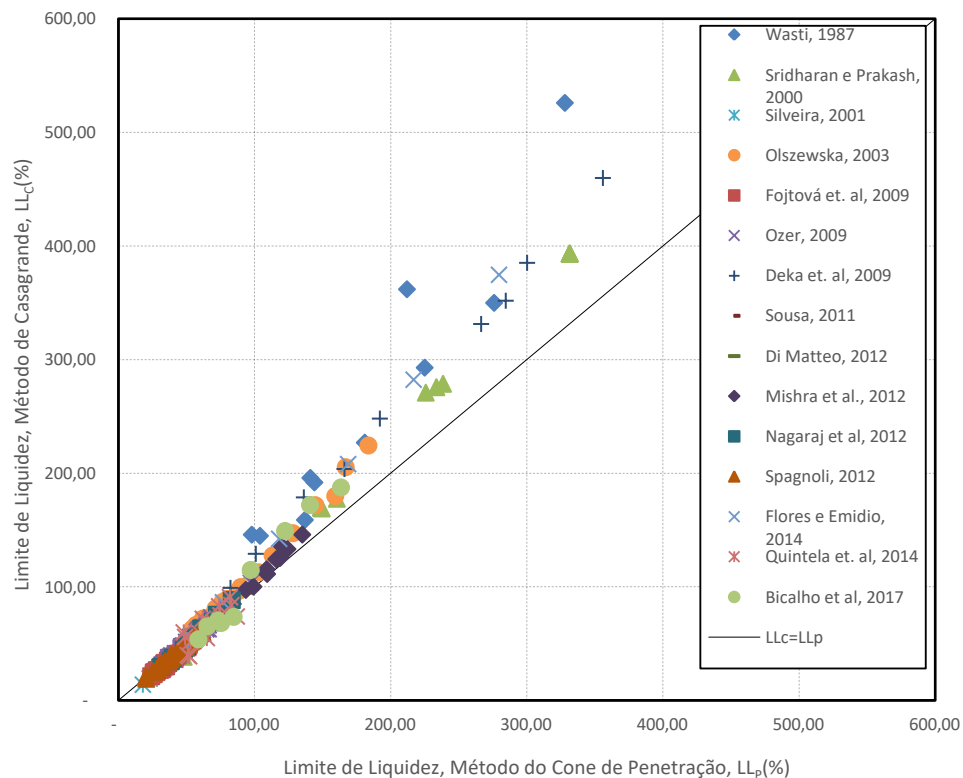
O método de preparação das amostras, no que diz respeito à secagem prévia, influencia nos resultados do Limite de Liquidez. No entanto, como em muitas

publicações esta informação não estava explícita, o processo de preparação das amostras não foi avaliado neste trabalho.

4.2. DADOS UTILIZADOS

Para avaliar as correlações entre os valores de limite de liquidez determinados pelos métodos de Casagrande ou de percussão (LL_c) e de cone de penetração ou simplesmente método do cone (LL_p) foram considerados os dados experimentais de 15 publicações totalizando uma amostra, n , de aproximadamente 305 dados para cada ensaio (percussão e penetração), conforme mostrado na Figura 4.1. Neste estudo foi avaliado o método do cone de penetração sugerido pela norma britânica (BS 1377, 1990), que consiste na queda de um cone de massa de $80 \pm 0,05$ g, ângulo de cone de $30 \pm 0,1^\circ$ e tempo de queda de 5 ± 1 s sobre uma amostra moldada de solo e obtendo-se o valor da penetração do cone, conforme apresentado no item 2.3.1. O valor de LL_p é definido pela umidade na qual o cone penetra 20 mm. Os resultados dos ensaios de determinação de LL_p foram comparados com os resultados dos ensaios de determinação de LL_c (base dura e base macia). As publicações investigadas neste estudo foram: Wasti (1987), Sridharan e Prakash (2000), Silveira (2001), Olszewska (2003), Fojtová et al. (2009), Ozer (2009), Deka et al. (2009), Sousa (2011), Di Matteo (2012), Mishra et al. (2012), Nagaraj et al. (2012), Spagnoli (2012), Flores e Emidio (2014), Quintela et al. (2014) e Bicalho et al. (2017).

Figura 4.1 - Resultados experimentais de LL_p - LL_c das 15 publicações investigadas nesta pesquisa (n = 305 amostras ensaiadas).



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Os resultados experimentais dos ensaios de determinação de LL_c apresentados na Figura 4.1, ou seja, pelo método à percussão, foram inicialmente separados de acordo com a dureza da base do aparelho de Casagrande em dois grupos: B-01 (aparelho de Casagrande base dura, $LL_{c-base\ dura}$) e B-02 (aparelho de Casagrande de base macia, $LL_{c-base\ macia}$).

A Tabela 4.1 apresenta um resumo das publicações investigadas no grupo B-01 (206 amostras ensaiadas). Os resultados dos dados avaliados no B-01 estão apresentados na Figura 4.2. Flores e Emídio (2014) apresentam resultados experimentais para argilas caulinitas puras e misturas de bentonitas e caulinitas, portanto os dados foram apresentados em separado na Tabela 4.1, em função da mineralogia dos solos ensaiados. Os resultados experimentais publicados por Bicalho et al. (2017) estão também separados na Tabela 4.1 em função da

mineralogia dos solos ensaiados (argilas naturais caulinitas e misturas de bentonitas e areias).

A Tabela 4.2 apresenta um resumo das publicações investigadas no grupo denominado B-02 (99 amostras ensaiadas). Os resultados dos dados avaliados no B-02 estão apresentados na Figura 4.3. Sridharan e Prakash (2000) apresentam resultados experimentais realizados em argilas caulinitas puras, montmorilonitas e misturas de bentonitas e areias, portanto os dados foram apresentados em separado no Quadro 2, em função da mineralogia dos solos ensaiados. Os resultados publicados por Olszewska (2003) e Nagaraj et al. (2012) também foram apresentados em separado no Quadro 2 em função da mineralogia dos solos ensaiados, uma vez que a primeira publicação apresentou resultados experimentais realizados em caulinitas naturais e misturas de bentonitas e caulinitas e a segunda publicação apresentou resultados de LL determinados em caulinitas naturais e montmorilonitas.

Tabela 4.1 - Resumo das publicações investigadas no grupo B-01 (LL_p e LL_{c-base dura}) com 206 amostras ensaiadas.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios	Aparelho de Casagrande utilizado
Wasti (1987)	B-01.a	Misturas Bentonitas e solos naturais	10	Base dura
Silveira (2001)	B-01.b	Solos tropicais do Pará, Maranhão, Piauí e Paraíba	5	Base dura (NBR 6459)
Deka et al. (2009)	B-01.c	Montmorilonitas	10	Base Dura (ASTM D 4318, 2010)
Fojtová et. al. (2009)	B-01.d	Não informado	52	Base dura
Ozer (2009)	B-01.e	Não informado	32	Base dura
Di Matteo (2012)	B-01.f	Caulinita	6	Base dura
Mishra et al. (2012)	B-01.g	Misturas bentonitas	12	Base Dura (ASTM D 4318, 2010)
Spagnoli (2012)	B-01.h	Caulinita e ílita	50	Base dura (DIN 18122)
Flores e Emidio (2014)	B-01.i	Caulinita	1	Base dura (ASTM D 4318, 2010)
	B-01.j	Misturas bentonita e caulinitas	5	Base Dura (ASTM D 4318, 2010)
Quintela et. al. (2014)	B-01.k	Caulinitas e ílitas	14	Base dura (ASTM D 4318, 2010)

Bicalho et al. (2017)	B-01.l	Argilas naturais da Grande Vitória –ES, Caulinita	5	Base dura (NBR 6459, 1984)
	B-01.m	Misturas bentonita e areia fina	4	Dura (NBR 6459, 1984)
	Total n° ensaios		206	

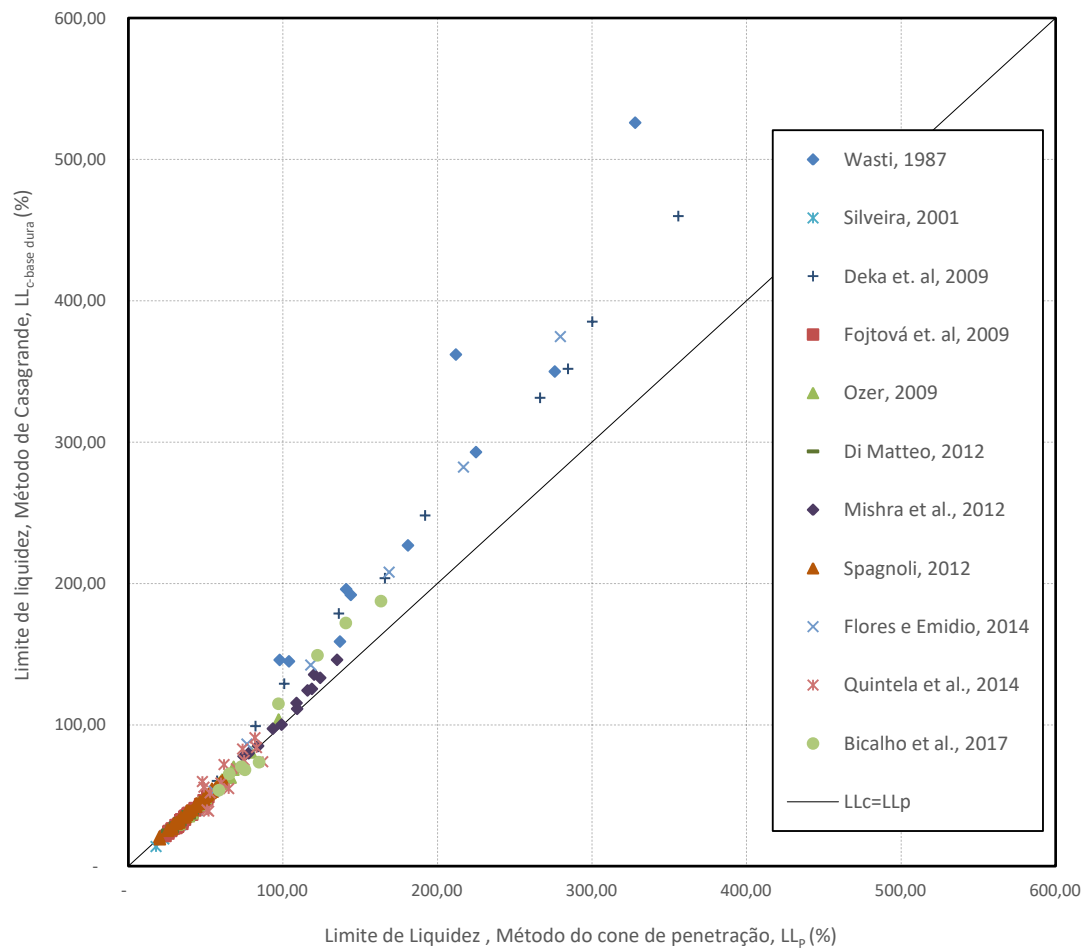
Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Tabela 4.2 - Resumo das publicações investigadas no grupo B-02 (LL_p e LL_{c-base macia}) com 99 amostras ensaiadas.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	n° ensaios	Aparelho de Casagrande utilizado
Sridharan e Prakash (2000)	B-02.a	Caulinitas	5	Base macia (BS 1377)
	B-02.b	Montmorilonitas e misturas de areia e bentonita	14	Base Macia (BS 1377)
Olszewska (2003)	B-02.c	Caulinitas	2	Base macia (BS 1377)
	B-02.d	Misturas bentonitas e caulinitas	20	Base Macia (BS 1377)
Ozer (2009)	B-02.e	Não informado	32	Base macia
Sousa (2011)	B-02.f	Caulinitas e Ilitas	16	Base macia (NP-143-LNEC, 1990)
Nagaraj et al (2012)	B-02.g	Caulinitas	5	Base macia (BS 1377)
	B-02.h	Montmorilonitas	5	Base Macia (BS 1377)
Total n° ensaios			99	

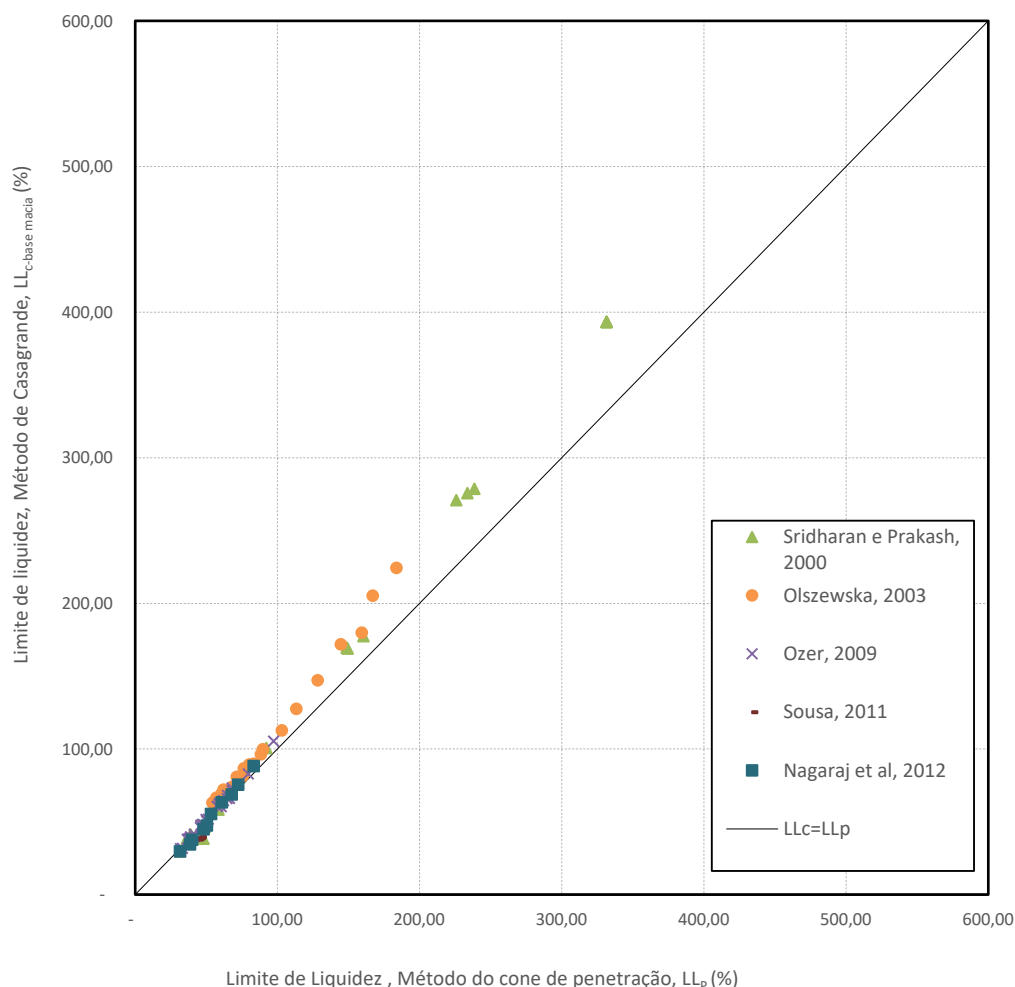
Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.2 - Resultados experimentais dos solos investigados no grupo B-01 ($LL_p - LL_{c-base\ dura}$), $n = 206$ amostras ensaiadas.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.3 - Resultados experimentais dos solos investigados no grupo B-02 ($LL_p - LL_{c-base\ macia}$), $n = 99$ amostras ensaiadas.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Para o grupo B-01, a partir dos dados experimentais da Figura 4.2 verificou-se que a transição entre os valores de baixo LL e alto LL é de aproximadamente 80%. Ou seja, $LL_c < LL_p$ para $LL_c < 80\%$ e $LL_c > LL_p$ para $LL_c > 80\%$. Para o grupo B-02, verificou-se a partir dos dados da Figura 4.3 que a transição entre os valores de baixo LL e alto LL é de aproximadamente 60%. Ou seja, $LL_c < LL_p$ para $LL_c < 60\%$ e $LL_c > LL_p$ para $LL_c > 60\%$.

Com uma caracterização adequada dos dados é possível padroniza-los de forma a garantir a confiabilidade e limitar a utilização das correlações propostas. Assim, a partir dos grupos de dados B-01 e B-02, separados conforme descrito anteriormente, foram definidos subgrupos para avaliação das correlações:

- B-01i: solos ensaiados formados essencialmente por caulinitas e ilitas.
- B-01ii: solos ensaiados formados essencialmente por montmorilonitas.
- B-01iii: solos ensaiados com $LL_c < 80\%$
- B-01iv: solos ensaiados com $LL_c > 80\%$
- B-02i: solos ensaiados formados essencialmente por caulinitas e ilitas.
- B-02ii: solos ensaiados formados essencialmente por montmorilonitas.
- B-02iii: solos ensaiados com $LL_c < 60\%$
- B-02iv: solos ensaiados com $LL_c > 60\%$

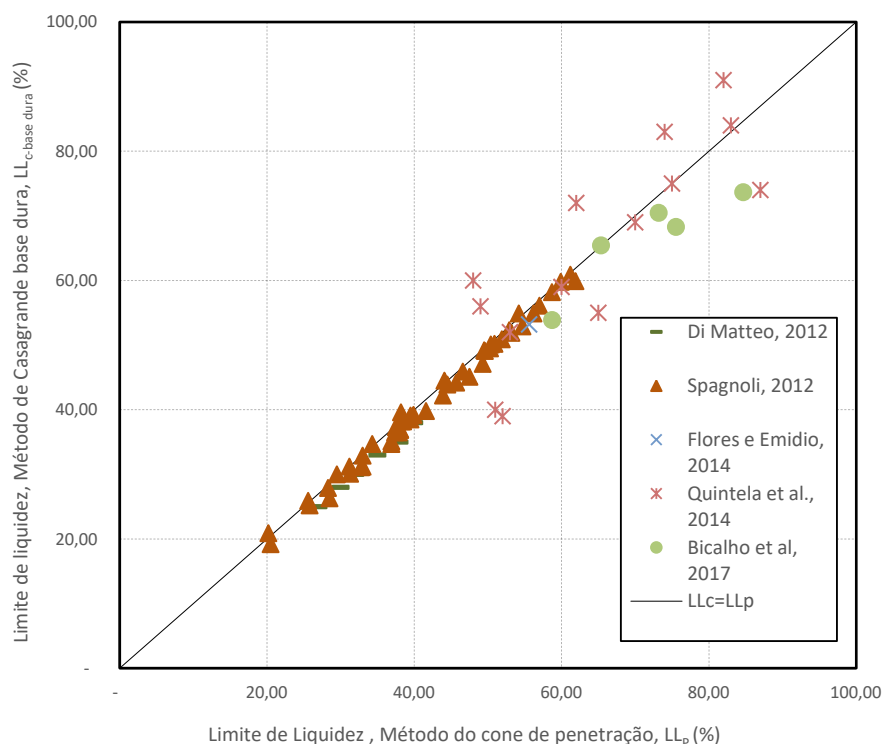
4.3. DESCRIÇÃO DOS DADOS DO GRUPO B-01

Nos itens 4.3.1, 4.3.2, 4.3.3 e 4.3.4 são descritos os dados utilizados nos subgrupos B-01i, B-01ii, B-01iii e B-01iv, respectivamente. No item 4.3.5 são descritos os dados das 11 publicações utilizadas no grupo B-01.

4.3.1. Descrição do subgrupo de dados B-01i

Na Figura 4.4 são apresentados os 76 pares de dados coletados e agrupados nesse subgrupo de dados B-01i, definido pelos solos apresentados no B-01 constituídos essencialmente por caulinitas e ilitas e publicados por: Di Matteo (2012), Spagnoli (2012), Flores e Emidio (2014), Quintela et al. (2014) e Bicalho et al. (2017). Na Tabela 4.3 são resumidas as publicações avaliadas no B-01i.

Figura 4.4 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01i (LL_p $LL_{c-base\ dura}$) de 5 publicações investigadas nesta pesquisa (n=76 amostras ensaiadas) formados essencialmente por caulinitas e ilitas.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Tabela 4.3 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01i (LL_p e $LL_{c-base\ dura}$), com n= 76 amostras ensaiadas de caulinitas e ilitas.

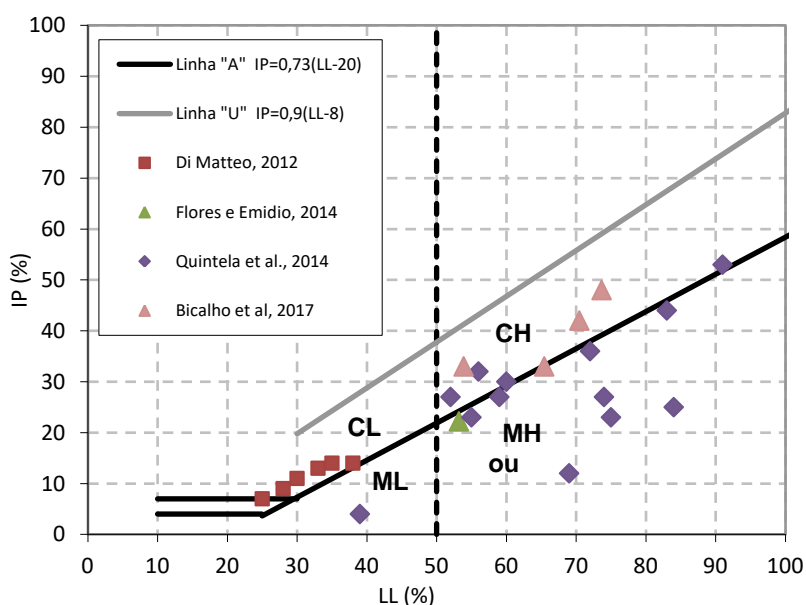
Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Di Matteo (2012)	B-01.f	Caulinita	6
Spagnoli (2012)	B-01.h	Caulinita e ilita	50
Flores e Emidio (2014)	B-01.i	Caulinita	1
Quintela et. al. (2014)	B-01.k	Caulinitas e ilitas	14
Bicalho et al. (2017)	B-01.l	Argilas naturais da Grande Vitória –ES, Caulinita	5
Total nº ensaios			76

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

A Figura 4.5 mostra a localização dos solos estudados no subgrupo B-01i no ábaco de Casagrande com a classificação proposta pelo Sistema Unificado de Classificação (SUC) para solos finos. Como o SUC utiliza os valores de LL

determinados pelo método de percussão, os resultados de LL apresentados na Figura 4.5 são os valores de LL_c . A relação entre LL e IP das caulinitas estudadas por Di Matteo (2012) tende a convergir para a reta A, considerada como a divisão arbitrada entre siltes e argilas do ábaco de Casagrande. Os resultados experimentais das caulinitas estudadas por Flores e Emidio (2014) e por Bicalho et al. (2017) também tendem a convergir para a reta A do ábaco de Casagrande. As argilas investigadas por Quintela et al. (2014) predominam na região de alta plasticidade dispersas no entorno da linha A do ábaco de Casagrande. Não foi possível plotar os resultados de Spagnoli (2012) na Figura 4.5, uma vez que o pesquisador não indicou os valores de IP para as amostras investigadas.

Figura 4.5 – Localização dos solos investigados no B-01i no ábaco de Casagrande.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.3.2. Descrição do subgrupo de dados B-01ii

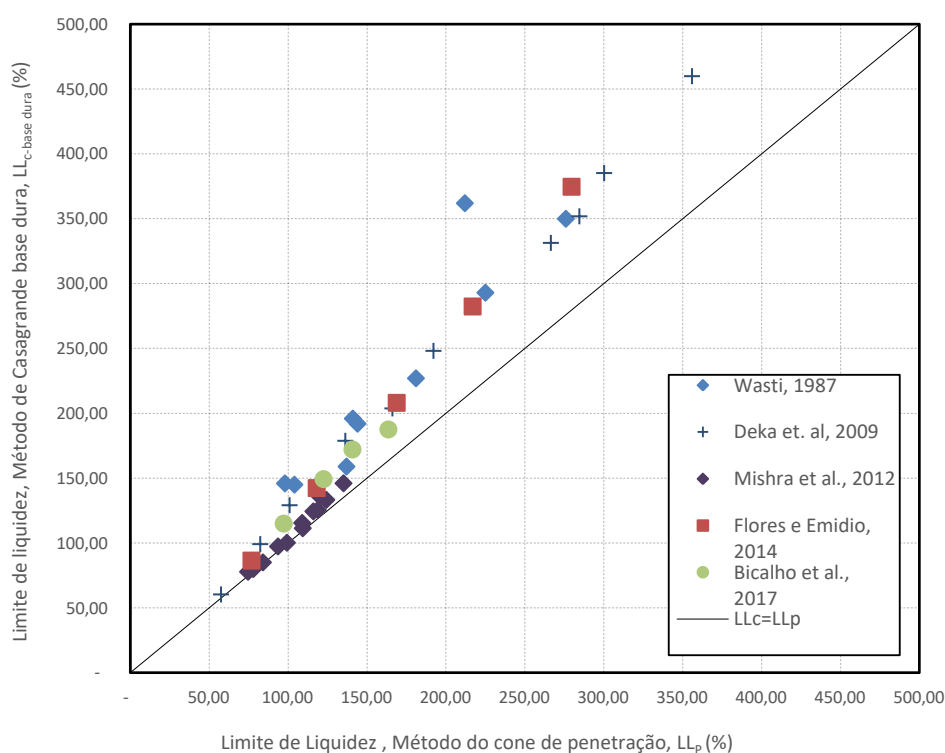
Na Figura 4.6 são apresentados os 41 pares $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p do grupo de dados B-01ii constituídos pelos solos formados essencialmente por montmorilonitas e publicados por: Wasti (1987), Deka et al (2009), Mishra et al. (2012), Flores e Emídio (2014) e Bicalho et al. (2017). Na Tabela 4.4 são resumidas as publicações avaliadas no B-01ii.

Tabela 4.4 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01ii (LL_p e $LL_{c-base\ dura}$) com 41 amostras ensaiadas de solos formados essencialmente por montmorilonitas.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Wasti (1987)	B-01.a	Misturas Bentonitas e solos naturais	10
Deka et al. (2009)	B-01.c	Montmorilonitas	10
Mishra et al. (2012)	B-01.g	Misturas bentonitas	12
Flores e Emídio (2014)	B-01.j	Misturas bentonita e caulinitas	5
Bicalho et al. (2017)	B-01.m	Misturas bentonita e areia fina	4
Total nº ensaios			41

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.6 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01ii (LL_p - $LL_{c-base\ dura}$) nesta pesquisa, com $n = 41$ amostras ensaiadas, formados essencialmente por montmorilonitas.

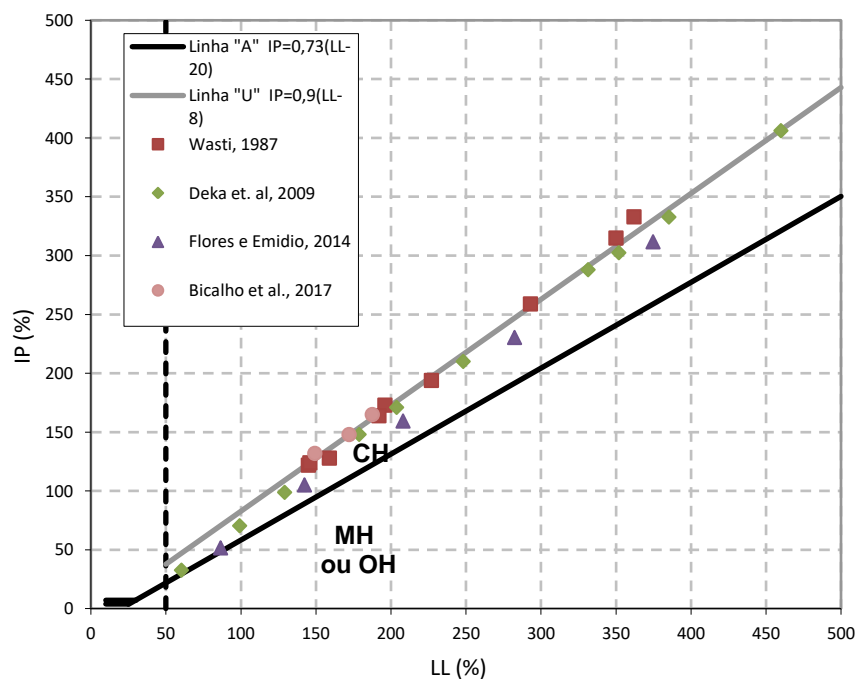


Fonte: Dados da pesquisa (2017).

A Figura 4.7 mostra a localização dos solos estudados do subgrupo B-01ii no ábaco de Casagrande com a classificação SUC. A relação entre LL e IP das misturas de bentonita estudadas por Wasti (1987) e por Bicalho (2017) tendem a convergir para

a reta U do ábaco de Casagrande. Os resultados experimentais das misturas de bentonita estudadas por Flores e Emidio (2014) e das montmorilonitas naturais estudadas por Deka (2009) tendem a convergir para a reta U do ábaco para maiores valores de LL. As misturas de bentonitas investigadas por Mishra et al. (2012) não foram plotadas na Figura 4.7, uma vez que os pesquisadores não indicaram os valores de IP para as amostras investigadas.

Figura 4.7 – Localização dos solos investigados no B-01ii no ábaco de Casagrande.



4.3.3. Descrição do subgrupo de dados B-01iii

Os dados coletados e agrupados nesse subgrupo de dados B-01iii são formados pelos solos do B-01 que possuem $LL_c < 80\%$ e publicados por: Silveira (2001), Fojtová et al. (2009), Ozer (2009), Deka et al. (2009), Di Matteo (2012), Mishra et al. (2012), Spagnoli (2012), Flores e Emídio (2014), Quintela et al. (2014) e Bicalho et al. (2017).

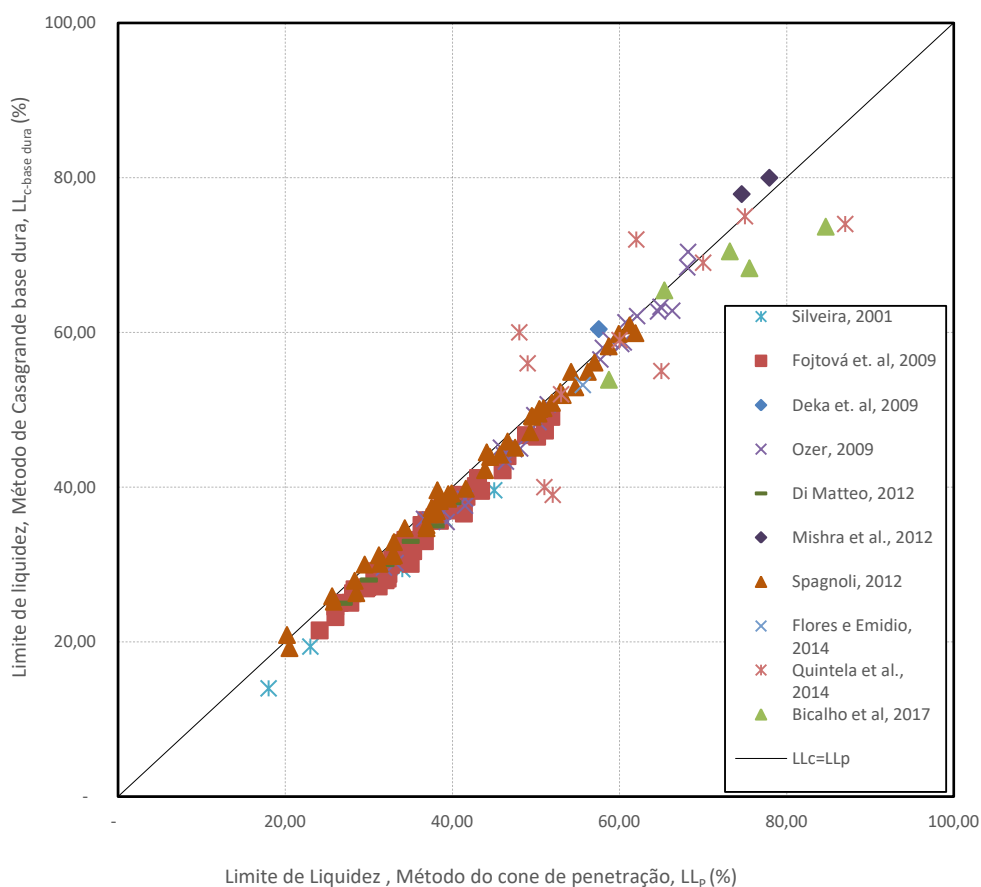
Conforme mostrado na tabela 4.5 e na Figura 4.8 foram agrupados os valores medidos de $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p para as 9 publicações avaliadas neste estudo, totalizando 163 pares de $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p .

Tabela 4.5 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01iii (LL_p e LL_{c-base dura}), com n=163 amostras ensaiadas de solos com LL_c<80%.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Silveira (2001)	B-01.b	Solos tropicais do Pará, Maranhão, Piauí e Paraíba	5
Deka et al. (2009)	B-01.c	Montmorilonitas	1
Fojtová et. al. (2009)	B-01.d	Não informado	52
Ozer (2009)	BD-01.e	Não informado	30
Di Matteo (2012)	B-01.f	Caulinita	6
Mishra et al. (2012)	B-01.g	Misturas bentonitas	2
Spagnoli (2012)	B-01.h	Caulinita e ilita	50
Flores e Emidio (2014)	B-01.i	Caulinita	1
Quintela et. al. (2014)	B-01.k	Caulinitas e ilitas	11
Bicalho et al. (2017)	B-01.l	Argilas naturais da Grande Vitória –ES, Caulinita	5
Total nº ensaios			163

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.8 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01iii ($LL_p - LL_{c-base\ dura}$) de 9 publicações investigadas nesta pesquisa (n=163 amostras ensaiadas) formados por amostras de solos com $LL_c < 80\%$.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.3.4. Descrição do subgrupo de dados B-01iv

Os dados coletados e agrupados nesse subgrupo de dados B-01iv são formados pelos solos do B-01 que possuem $LL_c > 80\%$ e publicados por: Wasti (1987), Deka et al. (2009), Ozer (2009), Mishra et al. (2012), Flores e Emídio (2014), Quintela et al. (2014) e Bicalho et al. (2017).

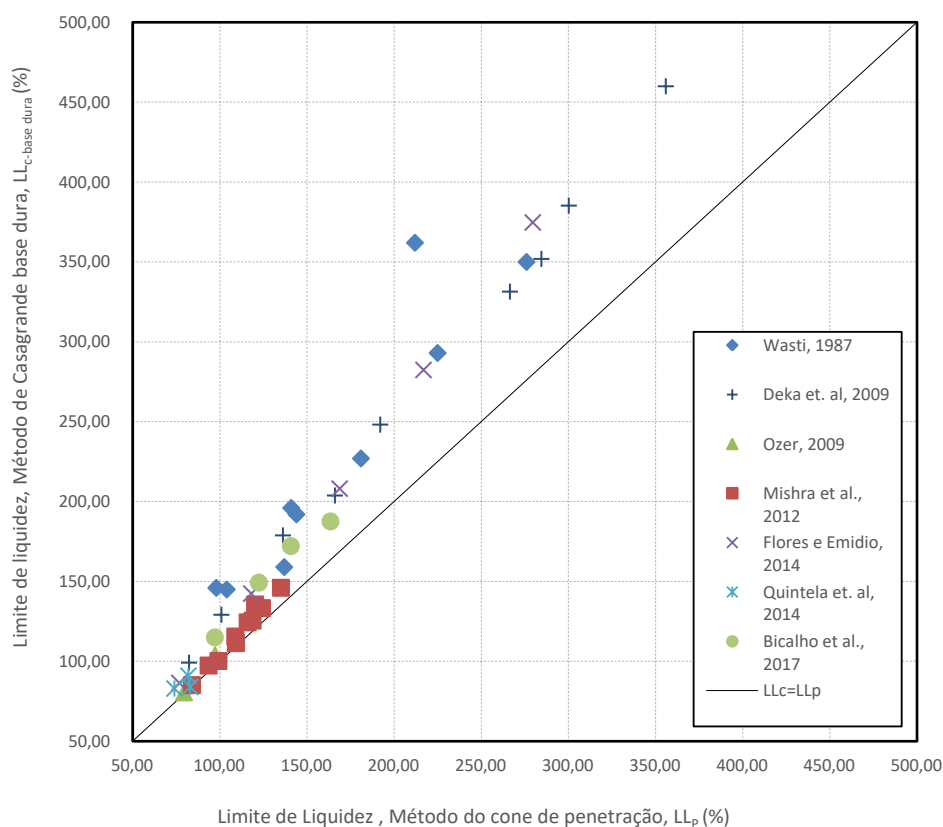
Conforme mostrado na tabela 4.6 e na Figura 4.9 foram agrupados os valores medidos de $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p para as 7 publicações avaliadas neste estudo, totalizando 43 pares de $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p .

Tabela 4.6 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-01iv (LL_p e $LL_{c-base\ dura}$) com 43 amostras ensaiadas de solos com $LL_c > 80\%$.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Wasti (1987)	B-01.a	Misturas Bentonitas e solos naturais	10
Deka et al. (2009)	B-01.c	Montmorilonitas	9
Ozer (2009)	B-01.e	Não informado	2
Mishra et al. (2012)	B-01.g	Misturas bentonitas	10
Flores e Emidio (2014)	B-01.j	Misturas bentonita e caulinitas	5
Quintela et. al. (2014)	B-01.k	Caulinitas e ilitas	3
Bicalho et al. (2014)	B-01.m	Misturas bentonita e areia fina	4
Total nº ensaios			43

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.9 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-01iv (LL_p - $LL_{c-base\ dura}$) de 7 publicações investigadas nesta pesquisa (n=43 amostras ensaiadas) formados por amostras de solos com $LL_c > 80\%$.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.3.5. Publicações utilizadas no B-01

B-01.a: Wasti (1987)

Wasti (1987) estudou 10 misturas de bentonitas com solos naturais da Turquia com densidades dos grãos (G_s) variando de 2,35 a 2,58 e em diversas proporções (C), conforme características mostradas na Tabela 4.7.

Foram utilizados os métodos do cone de penetração (cone britânico) e de Casagrande com base dura, cujos resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 145 a 526% e 98 a 328%, respectivamente.

Tabela 4.7 - Propriedades dos solos estudados por Wasti (1987).

Amostra	Classificação	G_s	C
16	Argila de alta plasticidade	2,38	88
17	Argila de alta plasticidade	2,35	84
18	Argila de alta plasticidade	2,48	63
19	Argila de alta plasticidade	2,53	41
20	Argila de alta plasticidade	2,55	50
21	Argila de alta plasticidade	2,58	42
22	Argila de alta plasticidade	2,57	44
23	Argila de alta plasticidade	2,44	86
24	Argila de alta plasticidade	2,50	74
25	Argila de alta plasticidade	2,55	68

Fonte: Wasti (1987)

BD-01.b: Silveira (2001)

Silveira (2001) estudou solos coesivos de baixa plasticidade provenientes de jazidas dos estados brasileiros: Pará, Maranhão, Piauí e Paraíba.

Foram determinados os limites de liquidez de cinco amostras pelos métodos do cone de penetração (cone britânico) e da concha de Casagrande (aparelho com base dura), cujos resultados de LL_c e LL_p dos solos investigados variaram entre 14 e 40% e 18 e 45%, respectivamente.

B-01.c: Deka et al.(2009):

Deka et al. (2009) avaliaram dez misturas de solos naturais, “RS” e “ES” em diversas proporções, conforme propriedades da Tabela 4.8.

Foram utilizados os métodos do cone de penetração (cone britânico) e de Casagrande com base dura, cujos resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 60,42 a 459,94% e 57,51 a 355,91%, respectivamente.

Tabela 4.8 - Propriedades dos solos estudados por Deka et al. (2009).

	Solo "RS"	Solo "ES"
G_s	2,62	2,24
% areia	44	0
% silte	27	28
% argila	29	72
Mineral	Quartzo e Magnetita	Montmorilonita, ilita e quartzo

Fonte: Deka et al.(2009).

BD-01.d: Fojtová et. al. (2009)

Os pesquisadores avaliaram o limite de liquidez de 52 amostras de solos naturais finos de Ostrava, na República Tcheca.

Os ensaios foram realizados com aparelho de Casagrande com base dura e cone de penetração britânico, cujos resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 21,49 a 49,56% e 24,11 a 51,83%, respectivamente.

BD-01.e: Ozer (2009)

O pesquisador ensaiou 42 amostras de solos naturais obtidos em vários locais da Turquia. Conforme apresentado na Tabela 4.9, foram realizados ensaios em amostras com diferentes plasticidades e distribuição granulométrica.

Os ensaios foram realizados com aparelho de Casagrande com bases dura (específico para este grupo de dados) e macia e cone de penetração britânico, cujos

resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 29,6 a 103,8% (para base dura) e 31,8 a 97,3%, respectivamente.

Tabela 4.9 - Distribuição granulométrica e classificação dos solos estudados por Ozer (2009).

Amos- tra	Classif. solo	Distribuição granulométrica (%)			Amos- tra	Classif. solo	Distribuição granulométrica (%)		
		Areia	Silte	Argila			Areia	Silte	Argila
1	CH	1,8	56	42,2	22	CL	22,4	54,3	21
2	CH	0,7	63,4	35,9	23	ML	35,4	37,5	27,1
3	CH	1,7	69,7	28,6	24	CL	19,2	55,8	22,4
4	MH	18,7	52,4	27,2	25	SM	53,7	39,1	7,2
5	MH	20,5	35,2	39,9	26	CL	16,2	63,7	19,4
6	CH	0,3	77,2	22,5	27	ML	14,6	49,9	35,5
7	MH	14	52,4	33,6	28	ML	39	44,9	14
8	CH	10,5	59,9	29	29	CL	37,4	41	12,8
9	CH	10,8	55,1	34,1	30	CL	38,1	42,7	16,2
10	MH	-	80,3	19,7	31	SC	43,8	37,1	9,1
11	CH	14,3	59,2	26	32	SC	36,4	32,4	9,9
12	CH	12,2	54,5	33,3	33	SC	38,5	34,8	12,8
13	CH	11,5	48	38,8	34	CL	30	66,6	3,4
14	CH	27,1	59,6	12,5	35	CL	18,9	58,9	16,2
15	CH	0,6	82,2	17,2	36	SC	49,2	22,8	4,5
16	CH	16,8	68,8	13,4	37	CL	26,7	44,3	18,6
17	CH	14,5	60,5	23,6	38	SC	52,6	37,4	7,2
18	CH	32,8	37	15,6	39	CL	41,9	49,5	7,8
19	CH	21,4	43,5	25,1	40	CL	16,3	72,6	11,1
20	CL	38,4	41	16,2	41	CL	30	52,2	13,9
21	CL	29,7	44,8	15,8	42	SC	47,8	28,9	6,9

Fonte: Ozer (2009).

BD-01.f: Di Matteo (2012)

Di Matteo (2012) estudou misturas em diversas proporções de areia fina, silte e argila, oriundos de depósito aluvial na Itália, conforme tabela 4.10.

Foram determinados os limites de liquidez de seis amostras pelos métodos do cone de penetração (cone britânico) e da concha de Casagrande (aparelho com base dura), cujos resultados de LL_c e LL_p dos solos investigados variaram entre 25 e 38% e 27 e 40%, respectivamente.

Tabela 4.10 - Propriedades dos solos investigados por Di Matteo (2012).

Solo	Distribuição do tamanho dos grãos (%)			G _s
	Areia	Silte	Argila	
1	2	66	32	2,73
2	9	63	28	2,71
3	17	57	26	2,7
4	26	52	22	2,71
5	35	46	19	2,69
6	44	40	16	2,7

Fonte: Di Matteo (2012).

B-01.g: Mishra et al. (2012):

Os pesquisadores estudaram o efeito dos tipos de bentonita e a presença da solução salina nos valores de limite de liquidez em doze misturas solo-bentonita, com diferentes bentonitas coletadas no Japão.

No referido estudo os valores de limite de liquidez das amostras foram determinados pelos métodos de Casagrande (aparelho de base dura) e do cone de queda (cone britânico), cujos resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 77,87 a 146,07% e 74,61 a 135,11%, respectivamente.

BD-01.h: Spagnoli (2012)

Spagnoli (2012) determinou os limites de liquidez de 50 amostras puras de caulinita e illita, abundantes nos sedimentos do Mar Báltico e do Mar do Norte, cuja composição química das argilas utilizadas no estudo é dada pela Tabela 4.11.

Os ensaios, que foram replicados para cada amostra, foram de acordo com as normas alemã (aparelho de Casagrande com base dura) e britânica (cone de penetração britânico).

Os resultados de LL_c e LL_p dos solos investigados variaram entre 18,8 e 61,3% e 20,20 e 61,9%, respectivamente.

Tabela 4.11 - Composição química das argilas estudadas por Spagnoli (2012).

Composição química	% (peso)
SiO ₂	46-51
Al ₂ O ₃	27-35
Fe ₂ O ₃	0,5-3
MgO	0,2-2,8
K ₂ O	2-10
CaO	0,1-0,4
TiO ₂	0,4

Fonte: Spagnoli (2012).

BD-01.i: Flores e Emidio (2014)

Flores e Emídio (2014) investigaram seis misturas artificiais de caulinitas e bentonitas em diversas proporções. No entanto, para este banco de dados B-01.i foi considerado apenas o resultado da amostra com proporções 100% Caulinita e 0% Bentonita.

Os ensaios foram realizados com aparelho de Casagrande com base dura e cone de penetração britânico, cujos resultados de LL_c e LL_p da amostra investigada foram 53,20 e 55,6%, respectivamente.

B-01.j: Flores e Emidio (2014):

Flores e Emídio (2014) estudaram misturas de Caulinitas e Bentonitas em diversas proporções, conforme propriedades da Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Propriedades dos solos estudados por Flores e Emidio (2014).

	Bentonita	Caulinita
Peso específico	2,52	2,64
LL	374,7	53,2
LP	62,9	31,0

Fonte: Flores e Emidio (2014).

BD-01.k: Quintela et al. (2014)

Os materiais estudados por Quintela et al. (2014) compreendem amostras no interior e no arquipélago de Portugal. A Tabela 4.13 mostra algumas das propriedades granulométricas e mineralógicas dos solos estudados. Os dados do tamanho do grão indicam que a maioria das amostras (60%) possui acima de 50% de teor de argila.

Os minerais de argila dos solos estudados mais proeminentes são a caulinita, ilita e esmectita. No entanto, para este banco de dados B-01 foram descartadas as amostras com teor considerável de esmectitas (amostras BV, C3, OS e SME da Tabela 4.13), considerando-se apenas as amostras com predominância de caulinitas e as ilitas.

Tabela 4.13 – Distribuição Granulométrica e mineralogia dos solos estudados por Quintela et al. (2014).

Amostra	% Granulometria (peso)			% Minerais		
	Areia	Silte	Argila	Caulinita	Esmectita	Ilita
ALV	-	39	61	85	-	15
BAR	1	40	59	51	11	38
BV	22	29	49	5	95	-
C1	42	29	30	78	9	13
C3	29	38	33	51	24	25
CR	8	20	72	60	-	40
MAR	3	27	70	84	-	16
RED	2	9	89	87	-	13
RN	3	33	64	67	2	31
TAV	4	48	48	57	2	41
B1	-	26	74	85	-	15
B2	3	20	77	51	11	38
CB	4	79	17	100	-	-
LAG	5	82	13	100	-	-
OS	2	62	36	-	100	-
RG	-	41	59	100	-	-
RT	19	39	42	100	-	-
SME	-	29	71	31	51	18

Fonte: Quintela et al. (2014).

BD-01.l: Bicalho et al. (2017)

Bicalho et al. (2017) avaliaram argilas naturais da Grande Vitória-ES (GV-ES) que, raramente apresentam mais de 30% retido na peneira número 200 (abertura de malha 0,075 mm), ou seja, tamanho de grãos maiores que silte ou argila.

As argilas da GV-ES têm valores da relação entre LL e IP (índice de plasticidade) localizados próxima da linha A no ábaco de Casagrande, ou seja, na divisão arbitrada entre silte e argila. Os valores de LL_c e LL_p obtidos para essas argilas variaram aproximadamente de 54 a 74% e 59 a 85%, respectivamente.

Os valores de limite de liquidez das amostras, realizados pelos métodos de Casagrande (aparelho de base dura) e do cone de queda (cone britânico), apresentaram resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 86,5 a 374,7% e 76,8 a 279,6%, respectivamente.

B-01.m: Bicalho et al. (2017):

Dentre outros solos considerados na publicação de Bicalho et al. (2017), foram incluídos nas análises realizadas neste estudo os resultados de quatro ensaios realizados em Vitória-ES em misturas homogeneizadas de bentonita (Montmorilonita sódica) e areia quartzosa fina em diferentes proporções (em relação ao peso total da mistura final).

Os valores de limite de liquidez das amostras foram determinados pelos métodos de Casagrande (aparelho de base dura) e do cone de queda (cone britânico), cujos resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas foram de 115 a 187,58% e 97,2 a 163,54%, respectivamente.

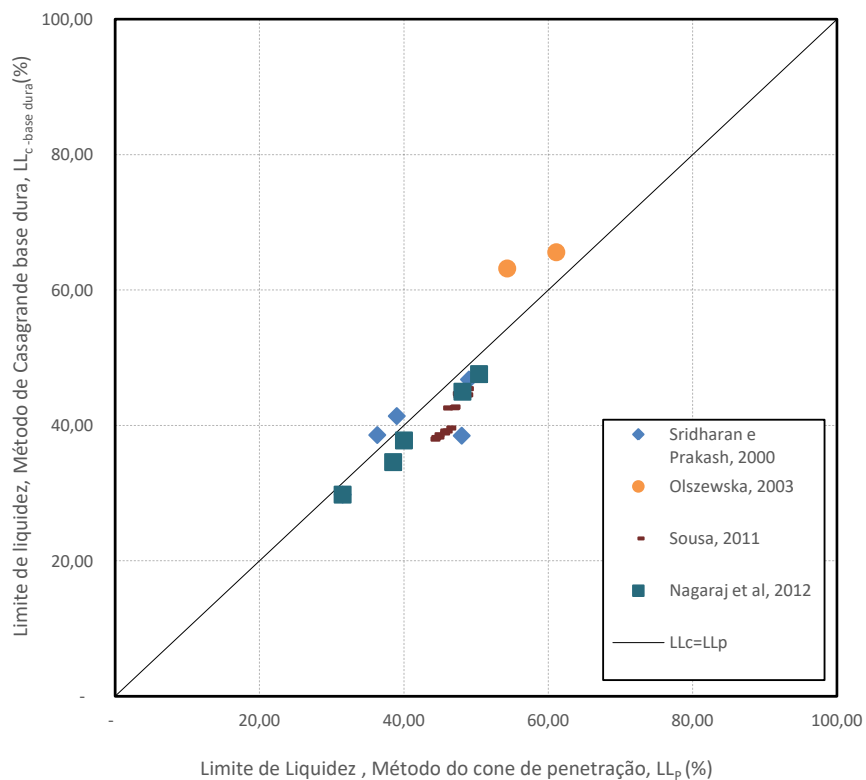
4.4. DESCRIÇÃO DOS DADOS DO GRUPO B-02

Nos itens 4.4.1, 4.4.2, 4.4.3 e 4.4.4 são descritos os dados utilizados nos subgrupos B-02i, B-02ii, B-02iii e B-02iv, respectivamente. No item 4.4.5 são descritos os dados das 5 publicações utilizadas no grupo B-02.

4.4.1. Descrição do subgrupo de dados B-02i

Na Figura 4.10 são apresentados 28 pares de dados coletados e agrupados no subgrupo de dados B-02i das caulinitas e ilitas e publicados por: Sridharan e Prakash (2000), Olszewska (2003), Ozer (2009), Sousa (2011) e Nagaraj et al. (2012). Na Tabela 4.14 são apresentadas as 4 publicações utilizadas no subgrupo B-02i e a quantidade pares de dados para cada publicação.

Figura 4.10 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02i (LL_p , $LL_{c-base\ dura}$) de 4 publicações investigadas nesta pesquisa, com $n=38$ amostras ensaiadas de caulinitas e ilitas.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

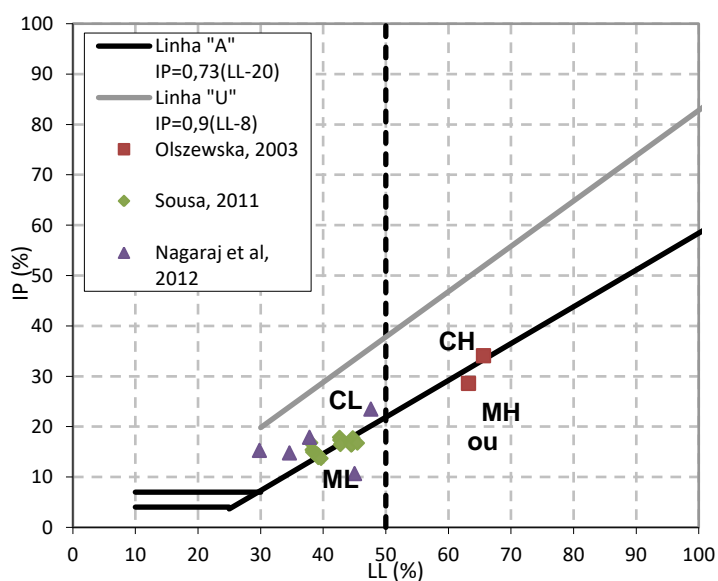
Tabela 4.14 - Resumo das 4 publicações e dos solos investigados no subgrupo B-02i (LL_p e $LL_{c-base\ macia}$), com $n=28$ solos ensaiados formados essencialmente por caulinitas e ilitas.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Sridharan e Prakash (2000)	B-02.a	Caulinitas	5
Olszewska (2003)	B-02.c	Caulinitas	2
Sousa (2011)	B-02.f	Caulinitas e Ilitas	16
Nagaraj et al (2012)	B-02.g	Caulinitas	5
Total nº ensaios			28

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

A Figura 4.11 mostra a localização dos solos estudados do subgrupo B-02i no ábaco de Casagrande. A relação entre LL e IP das caulinitas e ilitas estudadas por Olszewska (2003), Sousa (2011) e Nagaraj et al. (2012) tendem a convergir para a reta A do ábaco de Casagrande. Os resultados experimentais das caulinitas investigadas por Sridharan e Prakash (2000) não foram plotadas na Figura 4.11, uma vez que os pesquisadores não indicaram os valores de IP para as amostras investigadas.

Figura 4.11 – Localização dos solos investigados no B-02i no ábaco de Casagrande.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.4.2. Descrição do subgrupo de dados B-02ii

Os dados coletados e agrupados nesse grupo de dados B-02ii são definidos pelos solos apresentados no B-02 que são formados essencialmente por montmorilonitas e publicados por: Sridharan e Prakash (2000), Olszewska (2003), Nagaraj et al. (2012).

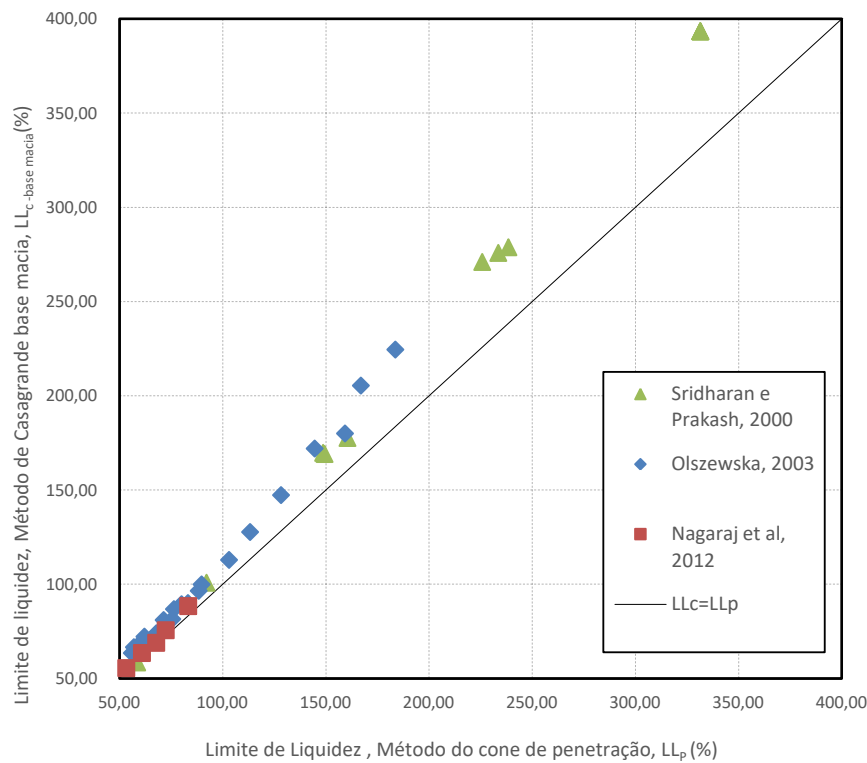
Na Tabela 4.15 são apresentadas as 3 publicações utilizadas no subgrupo B-02ii e a quantidade de ensaios de cada publicação. Na Figura 4.12 são apresentados os 39 pares de valores de $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p avaliados neste estudo.

Tabela 4.15 - Resumo das publicações e solos investigados no subgrupo B-02ii (LL_p e $LL_{c-base\ macia}$), com n= 39 amostras ensaiadas de solos formados essencialmente por montmorilonitas.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Sridharan e Prakash (2000)	B-02.b	Montmorilonitas e misturas de areia e bentonita	14
Olszewska (2003)	B-02.d	Misturas bentonitas e caulinitas	20
Nagaraj et al (2012)	B-02.h	Montmorilonitas	5
Total nº ensaios			39

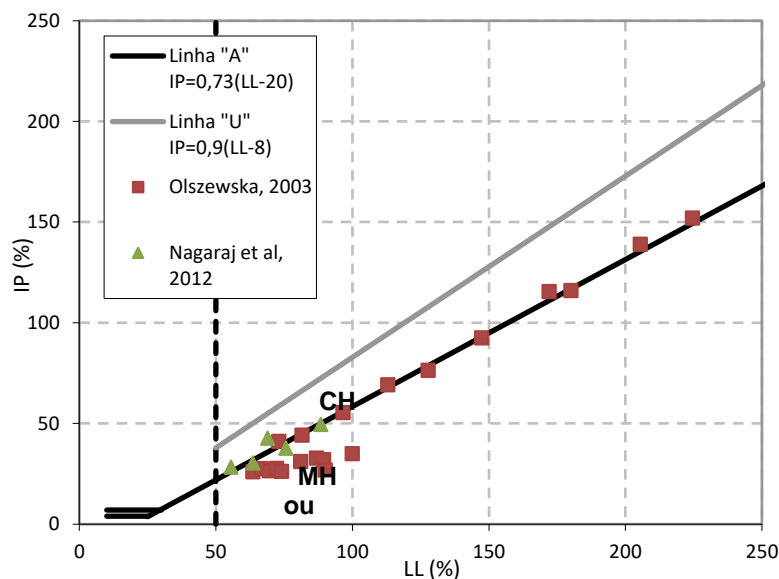
Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.12 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02ii (LL_p - $LL_{c-base\ macia}$) de 3 publicações investigadas nesta pesquisa (n = 39 ensaios) formados essencialmente por montmorilonitas.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

A Figura 4.13 mostra a localização dos solos estudados do subgrupo B-02ii no ábaco de Casagrande. A relação entre LL e IP das misturas de bentonitas e caulinitas estudadas por Olszewska (2003) tendem a convergir para a reta A do ábaco de Casagrande. Os resultados experimentais das montmorilonitas investigadas por Nagaraj et al. (2012) também tendem a convergir para a reta A do ábaco de Casagrande, principalmente para $LL > 100\%$. As montmorilonitas e as misturas de bentonitas e areias investigadas por Sridharan e Prakash (2000) não foram plotadas na Figura 4.13, uma vez que os pesquisadores não indicaram os valores de IP para as amostras investigadas.

Figura 4.13 – Localização dos solos investigados no B-02ii no ábaco de Casagrande.

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.4.3. Descrição do subgrupo de dados B-02iii

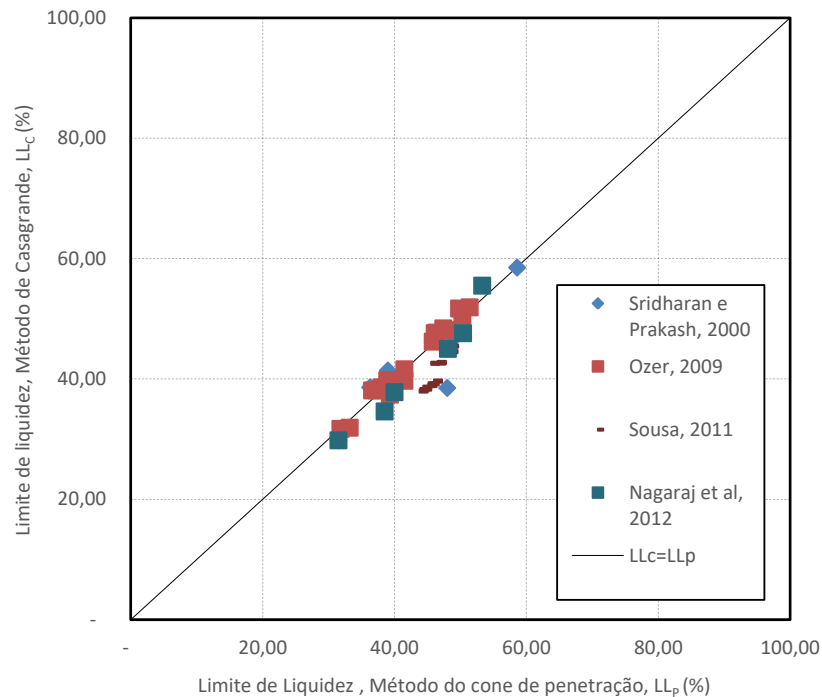
Na Figura 4.14 são apresentados os 46 pares de valores de $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p agrupados nesse subgrupo de dados B-02iii, formado pelos solos do B-02 com $LL_c < 60\%$ e publicados por: Sridharan e Prakash (2000), Sousa (2011) e Nagaraj et al. (2012). Na Tabela 4.16 são apresentadas as 3 publicações utilizadas neste subgrupo e a quantidade de ensaios de cada publicação.

Tabela 4.16 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-02iii (LL_p e $LL_{c-base\ macia}$) com 46 amostras ensaiadas de solos com $LL_c < 60\%$.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Sridharan e Prakash (2000)	B-02.a	Caulinitas	23
	B-02.b	Montmorilonitas e misturas de areia e bentonita	1
Ozer (2009)	B-02.e	Não informado	18
Sousa (2011)	B-02.f	Caulinitas e Ilitas	16
Nagaraj et al (2012)	B-02.g	Caulinitas	5
	B-02.h	Montmorilonitas	1
Total nº de ensaios			46

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.14 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02iii (LL_p - $LL_{c-base\ macia}$) de 3 publicações investigadas nesta pesquisa (n=46 amostras ensaiadas) formados por solos com $LL_c < 60\%$.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.4.4. Descrição do subgrupo de dados B-02iv

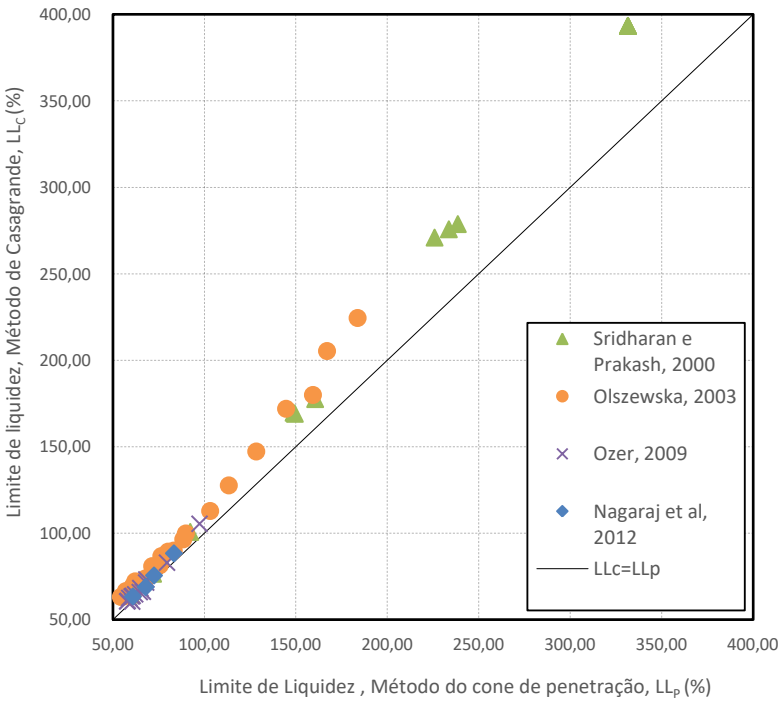
Na Figura 4.15 são apresentados os 53 pares de valores de $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p avaliados neste estudo para o B-02iv, ou seja, subgrupo formado pelos solos do B-02 com $LL_c > 60\%$ e publicados por: Sridharan e Prakash (2000), Olszewska (2003), Ozer (2009) e Nagaraj et al. (2012). Na Tabela 4.17 são apresentados os resumos dos ensaios das 4 publicações utilizadas neste subgrupo.

Tabela 4.17 - Resumo das publicações e dos solos investigados no subgrupo B-02iv (LL_p e $LL_{c-base\ macia}$) com 53 amostras ensaiadas de solos com $LL_c > 60\%$.

Referência	Grupo	Mineralogia do Solo	nº ensaios
Sridharan e Prakash (2000)	B-02.b	Montmorilonitas e misturas de areia e bentonita	13
Olszewska (2003)	B-02.c	Caulinitas	2
	B-02.d	Misturas bentonitas e caulinitas	20
Ozer (2009)	B-02.e	Não informado	14
Nagaraj et al (2012)	B-02.h	Montmorilonitas	4
Total nº ensaios			53

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Figura 4.15 - Resultados experimentais dos solos investigados no subgrupo B-02iv (LL_p - $LL_{c-base\ macia}$) de 4 publicações investigadas nesta pesquisa (n=53 amostras ensaiadas) formado por solos com $LL_c > 60\%$.



Fonte: Dados da pesquisa (2017).

4.4.5. Publicações utilizadas no B-02

B-02.a: Sridharan e Prakash (2000):

Os pesquisadores estudaram, dentre outros solos que serão tratados em banco de dados específico (B-02.b), o limite de liquidez de cinco amostras de solos naturais, essencialmente caulinitas.

Os ensaios foram realizados com aparelho de Casagrande com base macia e cone de penetração britânico, cujos resultados para as caulinitas variaram de 29,8 e 49%.

B-02.b: Sridharan e Prakash (2000):

Os pesquisadores estudaram o limite de liquidez de 14 amostras de argilas expansivas, sendo 5 delas solos naturais (montmorilonitas e caulinitas) e 9 misturas de bentonitas e areias em diversas proporções, utilizando os métodos de do cone de penetração (cone britânico) e de Casagrande com base macia.

As amostras estudadas apresentaram resultados de LL_c e LL_p entre 58,5 e 393,4% e 58,6 a 331,5%, respectivamente.

B-02.c: Olszewska (2003):

Olszewska (2003) investigou, dentre outros solos que serão tratados em banco de dados específico (B-02.d), o limite de liquidez de duas amostras de caulinitas naturais da Republica Tcheca.

Os ensaios foram realizados com aparelho de Casagrande com base macia e cone de penetração britânico, cujos resultados para as caulinitas variaram de 54 a 65%, aproximadamente.

B-02.d: Olszewska (2003):

Olszewska (2003) avaliou o limite de liquidez de 20 amostras de misturas de bentonitas e caulinitas da República Tcheca em diversas proporções.

Os ensaios, realizados com aparelho de Casagrande com base macia e cone de penetração britânico, apresentaram resultados de LL_c e LL_p das amostras de solos expansivos entre 63,5 e 224,5% e 56 a 183,7%, respectivamente.

B-02.e: Ozer (2009):

O pesquisador ensaiou 42 amostras de solos naturais obtidos em vários locais da Turquia, conforme Tabela 4.2 apresentada no item 4.2.

Os ensaios foram realizados com aparelho de Casagrande com bases dura e macia (específico para este banco de dados) e cone de penetração britânico, cujos resultados de LL_c e LL_p das amostras investigadas variam entre 31,7 e 105,5% (para base macia) e 31,8 e 97,3%, respectivamente.

B-02.f: Sousa (2011):

Sousa (2011) avaliou 16 amostras de solos naturais extraídos em regiões de Portugal, sendo estes argilas azuis (solo 1) e argilitos carbonatados (solo 2), ambos essencialmente formados por ilitas e caulinitas e ilitas, respectivamente. A porcentagem granulométrica média das amostras é dada pela Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Propriedades granulométricas dos solos estudados por Sousa (2011).

Solo	Areias (%)	Finos (%)	
		Siltes	Argilas
Argilas azuis de Xabregas	± 0,1	± 78,9	± 21
Argilitos carbonatados gipsíferos	± 2,4	± 75,3	± 22,3

Fonte: Sousa (2011).

B-02.g: Nagaraj et al. (2012):

Nagaraj et al. (2012) investigaram, dentre outros solos que serão tratados em banco de dados específico (B-02.h), o limite de liquidez de cinco amostras de caulinitas naturais da Índia, conforme características da Tabela 4.19.

Tabela 4.19 Distribuição Granulométrica e mineralogia dos solos estudados por Nagaraj et al. (2012).

Solo	G _s	Distribuição granulométrica (%)		
		Areia	Silte	Argila
1	2,70	45	47	8
2	2,69	46	42	12
3	2,67	28	60	12
4	2,65	38	58	4
5	2,66	46	47	7

Fonte: Nagaraj et al. (2012).

B-02.h: Nagaraj et al (2012):

Nagaraj et al. (2012) investigaram, além das caulinitas tratadas no B-02.g, o limite de liquidez de cinco amostras de siltes e argilas de alta plasticidade naturais da Índia, conforme características da Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Propriedades granulométricas dos solos estudados por Nagaraj et al. (2012).

Solo	G _s	W _p (%)	W _s (%)	Distribuição granulométrica (%)			Mineral argílico
				Areia	Silte	Argila	
6	2,70	27,2	8,5	19	43	38	Montmorilonita
7	2,71	33,1	8,5	14	45	41	Montmorilonita
8	2,69	26,2	9,8	2	56	42	Montmorilonita
9	2,71	37,9	11,1	4	27	69	Montmorilonita
10	2,70	38,9	9,8	12	25	63	Montmorilonita

Fonte: Nagaraj et al. (2012).

4.5. CORRELAÇÕES PUBLICADAS ENTRE LL_c E LL_p ESPECÍFICAS PARA B-01 E B-02

Na Tabela 4.21 são apresentadas algumas correlações lineares entre LL_c e LL_p publicadas na literatura, conforme mostrado na Tabela 2.6, no entanto agora específicas para as características do grupo de dados B-01, ou seja, para as publicações que utilizaram cone britânico e aparelho de determinação de $LL_{c-base\ dura}$. E na Tabela 4.22 são apresentadas algumas correlações lineares entre LL_c e LL_p específicas para as características do grupo de dados B-02, ou seja, para as publicações que utilizaram cone britânico e aparelho de determinação de $LL_{c-base\ macia}$. Os resultados apresentados nas Tabela 4.21 e 4.22 serão comparados com as correlações determinadas neste trabalho no capítulo de resultados (item 5).

Tabela 4.21 - Correlações lineares publicadas entre valores de LL_c e LL_p para diferentes solos argilosos. Ensaio realizado com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.

Referência	Intervalo LL	Correlação	Mineralogia
Belviso et al. (1985)	34-134	$LL_c = 1,031 LL_p - 1,227$	Não informado
Wasti (1987)	27-110	$LL_c = 0,994 LL_p - 4,893$	Não informado
Wasti (1987)	145-526	$LL_c = 1,704 LL_p - 55,06$	Montmorilonita
Di Matteo (2012)	20-50	$LL_c = LL_p - 2,2$	Caulinitas
Mishra et al. (2012)	70-150	$LL_c = 1,188 LL_p - 13,882$	Montmorilonita
Spagnoli (2012)	20-60	$LL_c = 1,01 LL_p - 1,061$	Caulinitas e ilitas
Bicalho et al (2017)	14-100	$LL_c = 1,00 LL_p - 2,7$	Caulinitas e ilitas
Bicalho et al. (2017)	>100	$LL_c = 1,11 LL_p + 10,0$	Montmorilonita

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

Tabela 4.22 - Correlações lineares publicadas entre valores de LL_c e LL_p para diferentes solos argilosos. Ensaio realizado com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.

Referência	Intervalo LL	Correlação	Mineralogia
Budhu (1985)	20-100	$LL_c = 1,069 LL_p - 4,299$	Não informado
Queiroz de Carvalho (1986)	13-48	$LL_c = 0,934 LL_p - 2,18$	Não informado
Sridharan e Prakash (2000)	33-92	$LL_c = 1,214 LL_p - 9,95$	Montmorilonitas e caulinitas
Sousa (2011)	38-40	$LL_c = 0,707 LL_p + 7,124$	Caulinitas e ilitas
Sousa (2011)	42-45	$LL_c = 0,906 LL_p + 1,119$	Caulinitas e ilitas

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

No capítulo 5 adiante serão mostrados os resultados da avaliação das correlações para cada banco de dados descrito neste capítulo 4.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados e suas discussões, obtidos por métodos estatísticos aplicados aos resultados experimentais de LL_c e LL_p , selecionados e descritos no Capítulo 4.

5.1. RESULTADOS PARA DADOS DO B-01

5.1.1. Resultados B-01i

As correlações definidas nesta pesquisa e apresentadas neste item foram obtidas a partir da avaliação de 76 dados de solos com LL aproximadamente entre 20 e 100%, sendo as caulinitas e as ilitas os minerais predominantes dessas argilas. A tabela 5.1 apresenta o resumo dos dados agrupados para o sub-grupo de dados B-01i, tanto para os dados completos (76 amostras de solo) quanto para os dados filtrados (71 amostras de solo), sendo estes os dados após eliminação dos *outliers*, ou pontos atípicos.

Tabela 5.1 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-01i

	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	46,71	47,80	19,20	91,00	76
Dados filtrados	46,22	46,89	19,20	91,00	71

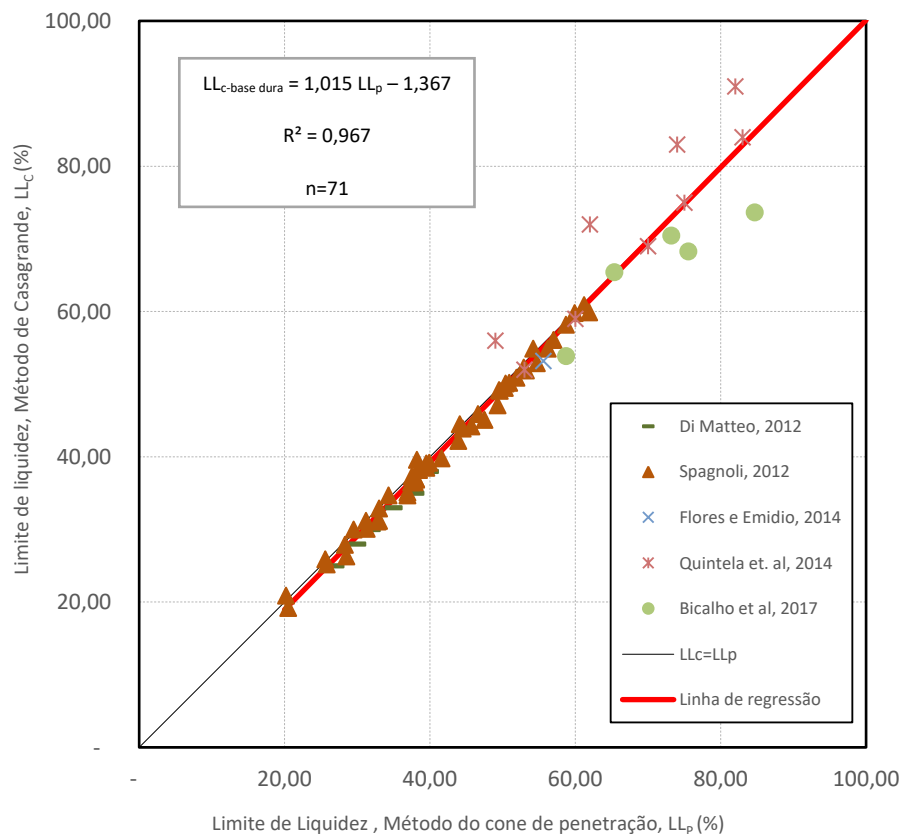
Fonte: Dados da pesquisa (2018).

O gráfico da Figura 5.1 apresenta os pares de dados e a correlação avaliada (Equação 5.1) para os dados filtrados, sendo que o R^2 de 0,967 pode ser considerado como muito forte.

Na figura 5.1 nota-se maior dispersão dos dados quando $LL > 60\%$, se aproximando da afirmação de Dragoni et al. (2008), e que $LL = 80\%$ define a transição entre os valores baixo LL e alto LL.

$$LL_{c-base} \quad dura \quad = \quad 1,015 \quad LL_p \quad - \quad 1,367 \quad (5.1)$$

Figura 5.1 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01i e linhas de tendência dos resultados experimentais, $LL_p - LL_{c-base \text{ dura}}$, após a exclusão dos outliers (n=71 amostras ensaiadas) para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e/ou ilitas com $20\% < LL_c < 100\%$.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Verifica-se na Figura 5.1 e na Equação 5.1 que LL_p é até 5,65% maior do que LL_c , sendo que essa diferença diminui à medida que LL aumenta, e que essa tendência está de acordo com as publicações prévias avaliadas que utilizaram aparelho à percussão de base dura e para argilas com mesma composição mineralógica (Di Matteo, 2012; Spagnoli, 2012; Bicalho et al., 2017).

Na tabela 5.2 são comparados os resultados dos coeficientes encontrados no modelo da Equação 5.1 com outras publicações prévias para mesma dureza da base do aparelho de Casagrande, mesma mineralogia e mesmo intervalo de LL . A

variação máxima observada entre LL_p e LL_c na Equação 5.1 (5,65%) está de acordo com a variação máxima da correlação proposta por Spagnoli (2012) para caulinitas e ilitas, ou seja, de 4,50%. Já as correlações propostas por Di Matteo (2012) e Bicalho et al. (2017) apresentaram maiores diferenças, ou seja, LL_p maior que LL_c até 12,36% e 15,61%, respectivamente, para LL_c entre 20 e 50%. As diferenças maiores observadas podem ser explicadas pelo fato de que a correlação de Bicalho et al. (2017) foi definida a partir de resultados de caulinitas e ilitas e de solos tropicais publicados por Silveira (2001) com formação mineralógica não investigada. Já a correlação proposta por Di Matteo (2012) foi definida a partir de resultados experimentais de outras publicações cuja mineralogia dos solos não foi definida, por exemplo Ozer (2009).

Tabela 5.2 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (BD-01i) e outras correlações publicadas para $LL_c < 100\%$. Ensaios com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.

LL_p	LL_p/LL_c (x100%)			
	Este trabalho - B-01i	Di Matteo (2012)	Spagnoli (2012)	Bicalho et al. (2017)
Intervalo de LL_c	20-100	20-50	20-60	14-100
20	105,65%	112,36%	104,50%	115,61%
30	103,17%	107,91%	102,60%	109,89%
40	101,97%	105,82%	101,68%	107,24%
50	101,27%	104,60%	101,13%	105,71%
60	100,80%	-	100,77%	104,71%
70	100,47%	-	-	104,01%
80	100,23%	-	-	103,49%
90	100,04%	-	-	103,09%
100	99,89%	-	-	102,77%

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A tabela 5.3 apresenta os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t), onde concluiu-se que os parâmetros da regressão não são significantes em relação aos dados observados, uma vez que o valor-p obtido para o teste F é maior do que a significância de 5%. O resultado do valor-p para o teste de aderência de Kolmogorov Smirnov (teste KS) para a amostra com dados filtrados mostra que o teste é satisfatório, ou seja, resíduos com distribuição normal, uma vez que o valor-p é

superior a significância de 5%. Ressalta-se que, neste caso, em função do tamanho da amostra, o teste Shapiro Wilk (teste SW) não foi utilizado. O teste de Durbin Watson (teste DW) avalia a independência entre os resíduos e sua análise é feita da mesma forma, através do valor-p, onde conclui-se que os resíduos não são independentes, pois $\text{valor-p} < \alpha$, com nível de significância de 95%.

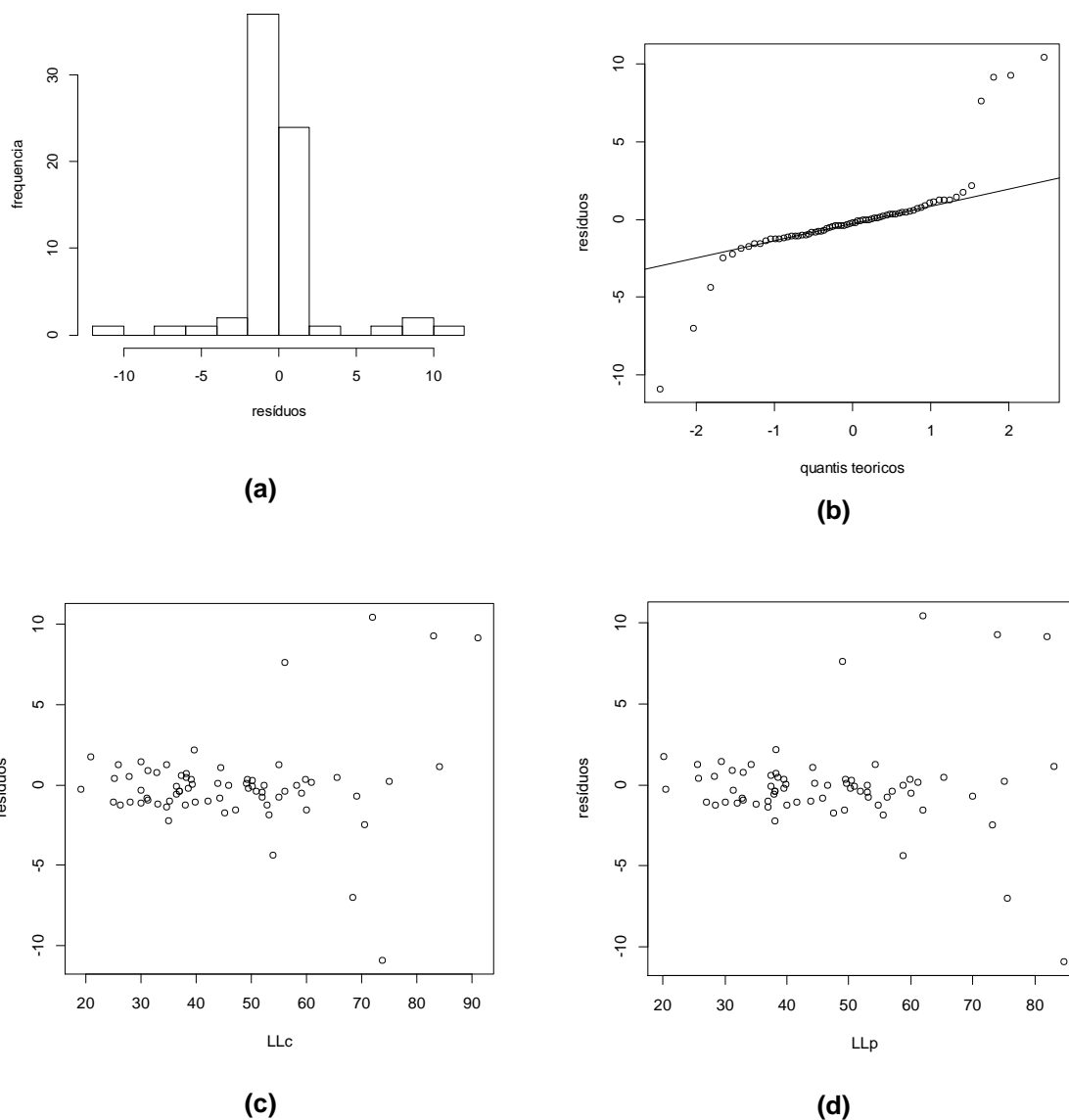
Tabela 5.3 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01i.

Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	0,227	Parâmetro não significativo
Teste t (x)	2,00E-16	Parâmetro significativo
Teste F	2,20E-16	Parâmetro significativo
Teste KS	0,2759	Distribuição Normal dos resíduos
Teste DW	0,007712	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A partir da Figura 5.2 é possível avaliar os resíduos graficamente. Ou seja, a tendência de normalidade é confirmada pelo histograma se aproximando do formato gaussiano (Figura 5.2a) e plotagem de probabilidade normal em formato de reta (Figura 5.2b). Os gráficos de dispersão dos resíduos (Figuras 5.2c e 5.2d) indicam que há uma tendência de heterocedasticidade, uma vez que estes não se apresentam como uma faixa retangular e de baixa amplitude (os resíduos variam de 10 a -10). De acordo com o teste DW não satisfatório, as figuras 5.2(c) e 5.2(d) indicam que os resíduos não são independentes, uma vez que não há uma tendência (cônica) no formato da distribuição dos mesmos.

Figura 5.2 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-01i: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Conclui-se que, apesar do valor de R^2 (0,967) indicar forte correlação entre os dados observados, as análises estatísticas do teste de hipóteses e de independência dos resíduos indicam que os coeficientes encontrados para regressão desses dados não são consistentes. Assim, a correlação da Equação 5.1 não pode ser aceita, talvez por que o teor de caulinitas e de ilitas exerça alguma influência sobre as correlações entre LL_c e LL_p .

Tabela 5.4 – Limite de Atterberg de minerais argilosos.

Argila	Tamanho das partículas (Microns)	Limite de Plasticidade	Limite de Liquidez	Índice de Plasticidade
<i>Ilita</i>				
1. Grundy Co., Illinois	Todos	35,70	61,20	25,50
	<1,0	39,59	83,00	43,41
	0,5	52,27	103,65	51,38
2. LaSalle Co., Illinois	Todos	24,75	35,90	11,15
	<1,0	46,21	85,55	39,34
	0,5	52,98	111,25	58,27
3. Vermilion Co., Illinois	Todos	23,87	29,05	5,18
	<1,0	44,44	95,05	50,61
	0,5	44,90		
4. Jackson Co., Ohio	Todos	28,77	53,95	25,18
	<1,0	35,16	61,25	26,09
<i>Caulinitas</i>				
5. Union Co., Illinois	Todos	36,29	58,35	22,06
	<1,0	37,14	64,20	27,06
	0,5	39,29	71,60	32,31
6. Twiggs Co., Georgia	Todos	29,86	34,98	5,12
<i>Montmorilonita</i>				
7. Belle Fourche, S. Dakota	Todos	97,04	625-700	528-603
8. Pontotoc, Mississippi	Todos	81,41	117,48	36,07
	<1,0	109,48	175,55	66,07

Fonte: White (1949).

Verifica-se ainda na Tabela 5.4, publicada por White (1949), que existe uma grande variação nos valores de limite de liquidez dentro das famílias dos minerais argilosos. Nesse sentido, a rejeição da Equação 5.1 pode ser atribuída também à variabilidade dentro das famílias das caulinitas e das ilitas.

5.1.2. Resultados para dados do B-01ii

As correlações definidas nesta pesquisa e apresentadas neste item foram obtidas a partir da avaliação de 41 dados de solos com limite de liquidez aproximadamente entre 60 e 500%, sendo as montmorilonitas os minerais predominantes dessas argilas. Na tabela 5.5 é apresentado o resumo dos dados agrupados para o banco de dados B-01ii para os dados completos e os dados filtrados, sendo estes os dados após eliminação dos *outliers*.

Tabela 5.5 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-01ii

	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	197,43	156,94	60,42	526,00	41
Dados filtrados	184,79	151,14	60,42	459,94	39

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

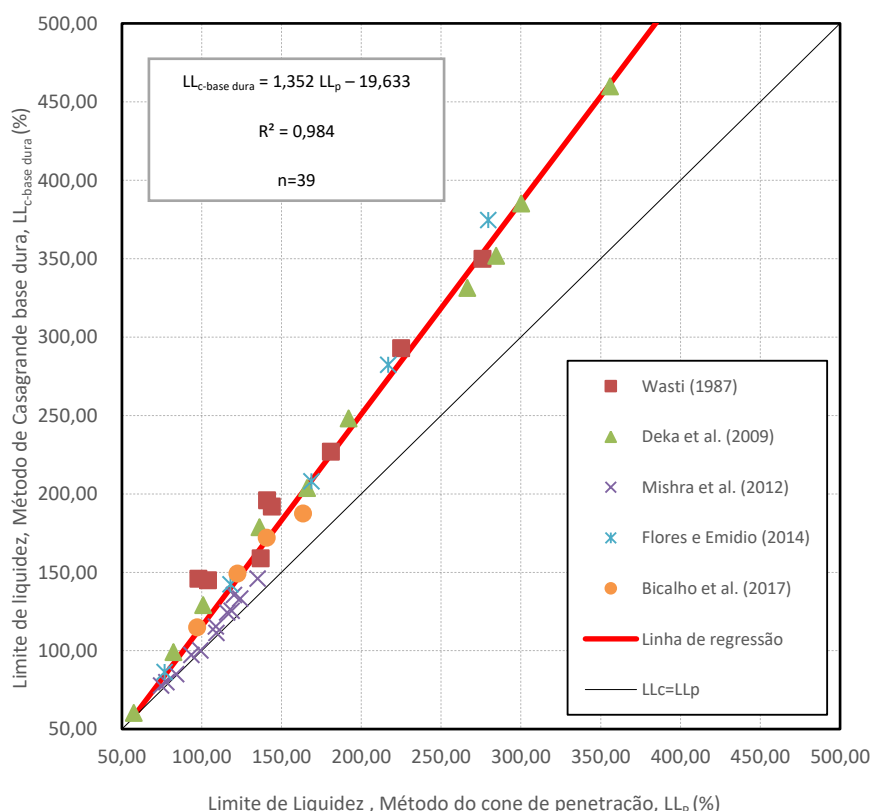
O gráfico da Figura 5.3 apresenta os pares de dados e a correlação avaliada (Equação 5.2) para os dados filtrados, sendo que o R^2 de 0,984 representa forte correlação entre os dados observados.

$$LL_{c-base} \quad \text{dura} \quad = \quad 1,352 \quad LL_p \quad - \quad 19,633 \quad (5.2)$$

Para as argilas formadas essencialmente por montmorilonitas, com LL_c entre 50 e 460%, a Figura 5.3 e Equação 5.2 apresentaram resultados de LL_c até 30% maiores do que LL_p , sendo que essa diferença é atenuada à medida que LL diminui, e que este comportamento está de acordo com as publicações prévias avaliadas que

utilizaram aparelho à percussão de base dura e para argilas com mesma composição mineralógica de Wasti (1987) e Mishra et al. (2012). Na correlação proposta por Bicalho et al. (2017) LL_c é maior do que LL_p , mas a diferença entre LL_c e LL_p aumenta à medida que LL diminui.

Figura 5.3 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01ii e linha de tendência dos resultados experimentais, $LL_p - LL_{c-base\ dura}$, após a exclusão dos outliers (n=39 amostras ensaiadas) para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

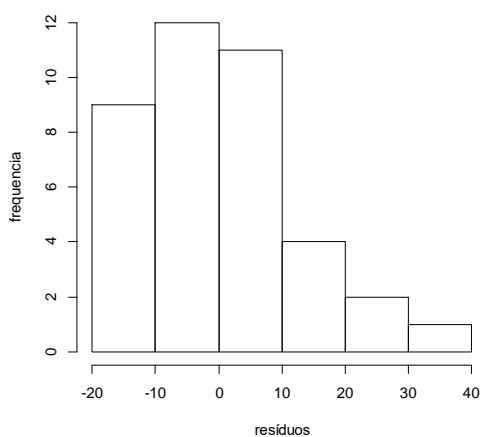
A tabela 5.6 apresenta os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t), onde concluiu-se que os parâmetros da regressão são significantes em relação aos dados observados. O resultado do valor-p para o teste de aderência KS para a amostra com dados filtrados mostra que o teste não é satisfatório, ou seja, resíduos não possuem distribuição normal (valor-p menor que a significância de 5%). Ressalta-se que, neste caso, em função do tamanho da amostra, o teste Shapiro Wilk (teste SW) não foi utilizado. O teste DW mostrou que os resíduos não são independentes (valor-p menor que a significância de 5%).

Tabela 5.6 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01ii.

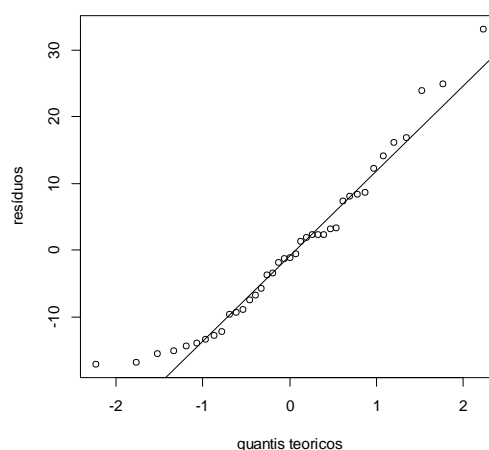
Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	1,65E-04	Parâmetro significativo
Teste t (x)	2,00E-16	Parâmetro significativo
Teste F	2,20E-16	Parâmetro significativo
Teste KS	3,02E-07	Distribuição dos resíduos não é normal
Teste DW	4,51E-05	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2017).

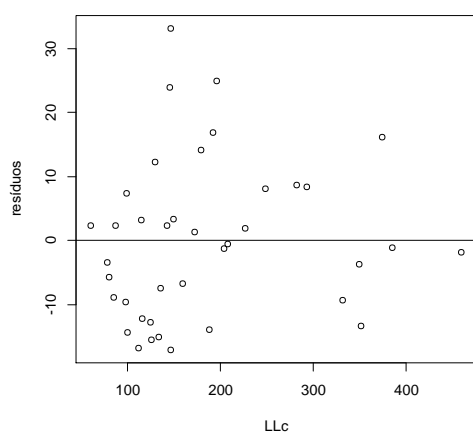
Figura 5.4 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LL_p e LL_c – B-01ii: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LL_c ; (d) Dispersão dos resíduos - LL_p



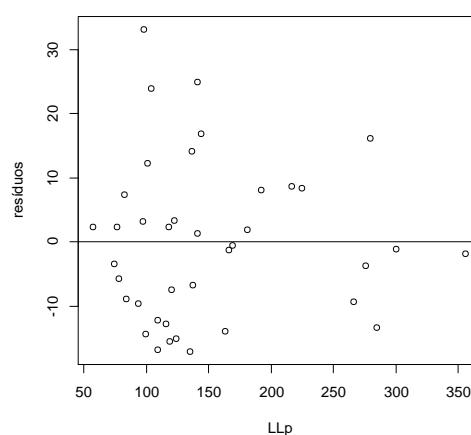
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na Figura 5.4 verifica-se que não existe tendência de normalidade dos resíduos no histograma, ou seja, diferente do formato gaussiano (Figura 5.4a) e a plotagem de probabilidade normal não tende ao formato de reta (Figura 5.4b). Os gráficos de dispersão dos resíduos (Figuras 5.4c e 5.4d) indicam que há uma tendência de heterocedasticidade (variância não constante) do modelo, pois os resíduos não se apresentam distribuídos em uma faixa horizontal de baixa amplitude. Nas Figuras 5.4(c) e 5.4(d) confirma-se o resultado do teste DW não satisfatório, ou seja, os resíduos não são independentes. Assim, apesar do R^2 alto (0,984), conclui-se que a correlação da Equação 5.2 não é válida, em função dos testes estatísticos dos resíduos.

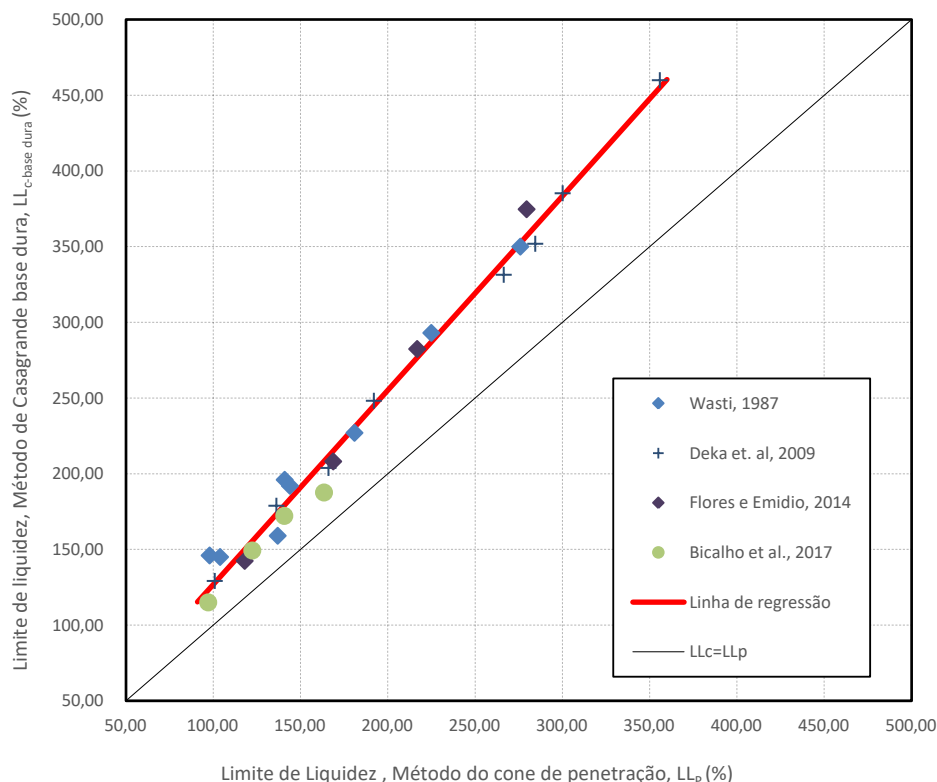
Com os resultados não satisfatórios da Equação 5.2, foi realizada nova filtragem dos dados do B-01ii, ou seja, foram desconsiderados os resultados de solos argilosos com teor de montmorilonita menor do que 30%. Bicalho et al. (2002) verificaram que, no caso das misturas de areia fina e bentonitas, quando o teor de argila, C , é maior do 30% a matriz argilosa domina o comportamento do solo, sem que haja contato entre os grãos de areia. Ressalta-se que esse critério, ou seja, utilização dos solos com teor de montmorilonita acima de 30%, foi considerado em todos os dados do B-01ii, e não só para os dados de misturas de areia e bentonitas deste grupo. Assim, foram desconsiderados todos os doze dados publicados por Mishra et al. (2012), dois dados publicados por Deka et al. (2009) e um dado de Flores e Emídio (2014). O resultado dos 24 pares de dados de misturas de argilas ou areias com bentonitas, com LL_c variando entre 115,00% e 459,94% e média de 234,51%, dado pela Equação 5.3, apresentou R^2 (0,987) maior em relação à análise anterior para o B-01ii.

$$LL_{c-base} \quad \text{dura} \quad = \quad 1,283 \quad LL_p \quad - \quad 1,472 \quad (5.3)$$

Para as argilas formadas essencialmente por montmorilonitas, com LL_c entre 115 e 460%, aproximadamente, a Figura 5.5 e Equação 5.3 apresentaram resultados de LL_c até 28% maiores do que LL_p , sendo que essa diferença é atenuada à medida que LL diminui (para LL_c igual a 115%, LL_c é 26,6% maior do que LL_p). Verifica-se que os resultados da Equação 5.3 foram muito próximos dos resultados da Equação 5.2. A

variação máxima entre LL_c e LL_p verificada na Equação 5.3 é aproximadamente 2% menor que variação máxima observada na Equação 5.2 (30%).

Figura 5.5 – Dispersão dos novos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01ii e linha de tendência dos resultados experimentais, $LL_p - LL_{c-base\ dura}$, para após a exclusão dos outliers (n=24 amostras ensaiadas) para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas com LL_c entre 115 e 460%.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na Tabela 5.7 são comparados os resultados dos coeficientes encontrados na Equação 5.3 com outras publicações prévias para mesma dureza da base do aparelho de Casagrande, mesma mineralogia e mesmo intervalo de LL dos solos investigados (Wasti, 1987; Mishra et al., 2012; Bicalho et al., 2017). Verifica-se que, apesar de todas as equações comparadas apresentarem resultado de LL_c maiores do que LL_p conforme esperado, a Equação 5.3 apresentou resultados diferentes e as diferenças entre LL_c e LL_p divergem entre todas as correlações comparadas. Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de que a equação 5.3 foi definida a partir de resultados com solos compostos por montmorilonita de forma geral, ou seja, foram utilizados os dados de misturas com diferentes proporções ($C > 30\%$) de solos

argilosos e bentonitas e areias e bentonitas. A correlação de Wasti (1987) foi definida somente a partir de dados de misturas de solos argilosos e bentonitas em diversas proporções, enquanto a correlação de Mishra et al. (2012) foi definida a partir de misturas de solos argilosos e diferentes bentonitas, com mesma proporção (20% de bentonita). A correlação proposta por Bicalho et al. (2017) foi determinada com resultados de misturas de areias e bentonitas em diversas proporções ($C > 60\%$). Além disso, o processo de hidratação das bentonitas pode influenciar nas diferenças entre LL_c e LL_p . No entanto, não foi possível verificar o tempo de hidratação da bentonita em todos os dados utilizados nesta pesquisa e nas correlações prévias aqui comparadas, exceto nas misturas de areias e bentonitas de Bicalho et al. (2017), cujo tempo de hidratação da bentonita foi de 7 dias.

Tabela 5.7 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (BD-01ii) e outras correlações publicadas para $80\% < LL_c < 460\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.

LL_p	$LL_c/LL_p (\times 100\%)$			
	Este trabalho - B-01ii	Wasti (1987)	Mishra et al. (2012)	Bicalho et al. (2017)
Intervalo de LL	115-460	145-526	70-150	100-160
80	-	101,58%	101,45%	123,50%
100	126,83%	115,34%	104,92%	121,00%
150	127,32%	133,69%	109,55%	117,67%
200	127,56%	142,87%	-	-
250	127,71%	148,38%	-	-
300	127,81%	152,05%	-	-
350	127,88%	154,67%	-	-
360	127,89%	-	-	-
400	127,93%	-	-	-

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A avaliação dos resíduos mostrou que o valor-p (0,7162) maior que a significância de 5% para o teste de aderência SW é satisfatório, ou seja, os resíduos possuem distribuição normal. E, o valor-p (0,266) do teste DW mostrou que os resíduos são independentes. Assim, conclui-se que a equação 5.3 é válida, para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas ($C > 30\%$), com LL_c entre 115 e 460%.

5.1.3. Resultados para dados do B-01iii

A tabela 5.8 apresenta o resumo dos dados agrupados para o grupo de dados definidos no B-01iii, ou seja, solos argilosos com diferentes mineralogias e LL entre 20 e 80%, para os dados completos e para os dados filtrados.

Tabela 5.8 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-01iii

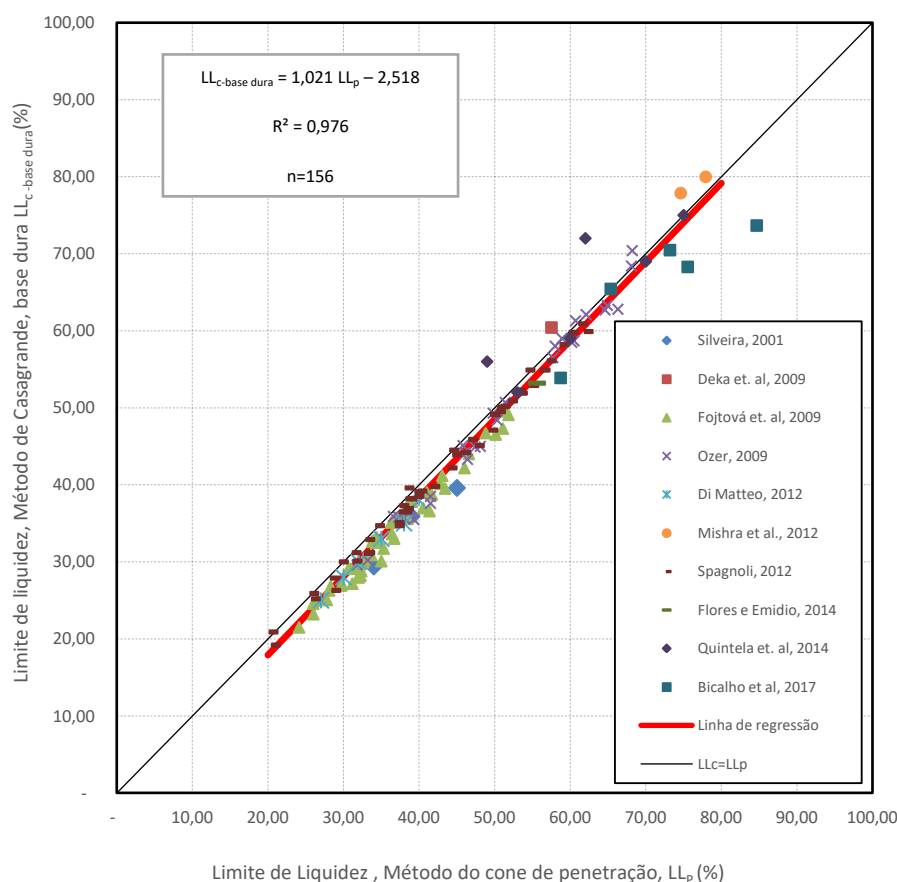
	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	42,12	43,92	14,00	79,98	163
Dados filtrados	42,08	43,68	19,20	79,98	156

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

O gráfico da Figura 5.6 apresenta os pares de dados e a correlação avaliada (Equação 5.4) para os dados filtrados, sendo que o R^2 de 0,976 representa forte correlação entre os dados observados.

$$LL_{c-base} \quad dura \quad = \quad 1,021 \quad LL_p \quad - \quad 2,518 \quad (5.4)$$

Figura 5.6 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01iii para 10 publicações após a exclusão dos outliers (n=156 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base\ dura}$ para solos argilosos com LL_c entre 20 e 80%



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Para as argilas formadas por diversas mineralogias e LL_c entre 20 e 80% verifica-se na Figura 5.6 e na Equação 5.4 comportamento dos resultados similar ao da Equação 5.1, ou seja, que LL_p é maior do que LL_c , sendo que essa diferença diminui à medida que LL aumenta. No entanto, LL_p é maior do que LL_c em até 11,72%, ou seja, a Equação 5.4 apresentou variação entre LL_p e LL_c 6,07% a mais do que a Equação 5.1, para mesma faixa de valor de LL . Nota-se que a variação maior obtida na Equação 5.4 é em função da avaliação de solos argilosos com diferentes mineralogias. Ou seja, a Equação 5.1 mostrou que para solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas as diferenças entre LL_p e LL_c serão menores do que solos com quaisquer formações mineralógicas, para uma mesma faixa de valores de LL .

Na Tabela 5.9 são comparados os resultados dos coeficientes da Equação 5.4 com outras publicações prévias para mesma dureza da base do aparelho de Casagrande e mesmo intervalo de LL (Wasti, 1987; Ozer, 2009; Fojtová, 2009; Di Matteo, 2012; Spagnoli, 2012; Bicalho et al., 2017). Em relação às correlações propostas por Wasti (1987), Fojtová (2009) e Di Matteo (2012), investigadas para argilas naturais cuja mineralogia não foi especificada nas publicações, os resultados da Equação 5.4 apresentaram comportamento semelhante. No entanto, os resultados foram muito próximos das correlações publicadas por Fojtová (2009) e Di Matteo (2012). Observa-se também que os resultados são parecidos com a publicação de Bicalho et al. (2017), sendo que este comportamento pode ser atribuído ao fato de que a correlação foi avaliada pelos pesquisadores com resultados, além de caulinitas e ilitas, de solos tropicais com mineralogia não indicada. Os resultados da correlação proposta por Wasti (1987) apresentaram diferença máxima observada entre LL_p e LL_c maior (20,35%). Em relação à publicação de Ozer (2009), também investigada para argilas naturais cuja mineralogia não foi especificada na publicação, os resultados apresentam comportamento diferente, uma vez que para $LL_c > 70\%$ $LL_p < LL_c$.

Tabela 5.9 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (BD-01iii) e outras correlações publicadas para $LL_c < 100\%$. Ensaios com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.

LL_p	LL_p/LL_c (x100%)						
	Este trabalho - B-01iii	Wasti (1987)	Ozer (2009)	Fojtová (2009)	Di Matteo (2012)	Spagnoli (2012)	Bicalho et al. (2017)
Intervalo de LL_c	20-80	27-110	29-104	20-50	20-50	20-60	14-100
20	111,72%	-	-	113,90%	112,36%	104,50%	115,61%
30	106,72%	120,35%	112,82%	108,85%	107,91%	102,60%	109,89%
40	104,38%	114,72%	106,13%	106,50%	105,82%	101,68%	107,24%
50	103,02%	111,59%	102,48%	105,13%	104,60%	101,13%	105,71%
60	102,14%	109,60%	100,18%	-	-	100,77%	104,71%
70	101,52%	108,21%	98,61%	-	-	-	104,01%
80	101,06%	107,20%	97,45%	-	-	-	103,49%
90	-	106,42%	96,58%	-	-	-	103,09%
100	-	105,81%	95,89%	-	-	-	102,77%

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

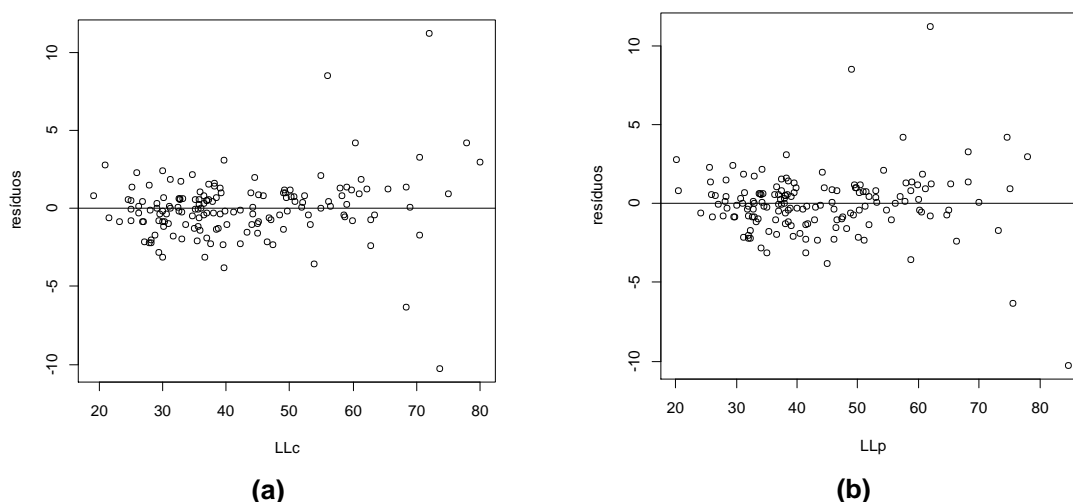
A tabela 5.10 apresenta os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t), onde concluiu-se que os parâmetros da regressão são significantes em relação aos dados observados. O resultado do valor-p para o teste de aderência KS para a amostra com dados filtrados mostra que o teste é satisfatório, ou seja, resíduos possuem distribuição normal (valor-p maior que a significância de 5%). O teste DW mostrou que os resíduos não são independentes (valor-p menor que a significância de 5%).

Tabela 5.10 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01iii.

Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	2,54E-05	Parâmetro significativo
Teste t (x)	2,00E-16	Parâmetro significativo
Teste F	2,20E-16	Parâmetro significativo
Teste KS	0,071	Distribuição dos resíduos normal
Teste DW	1,33E-05	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Figura 5.7 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LL_p e LL_c – B-01iii: (a) Dispersão dos resíduos – LL_c ; (b) Dispersão dos resíduos - LL_p



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Os gráficos de dispersão dos resíduos (Figuras 5.7a e 5.7b) indicam que há uma tendência de homocedasticidade (variância constante) do modelo, pois a maioria dos resíduos se apresentam distribuídos em uma faixa horizontal de baixa

amplitude. A Figura 5.7 contraria o resultado do teste DW não satisfatório, ou seja, uma vez que a distribuição dos resíduos não apresenta uma tendência. Assim, através da análise gráfica, considera-se que os resíduos são independentes.

Após análise dos resíduos e em função do teste DW conclui-se que a correlação da Equação 5.4 deve ser utilizada com cautela, para solos argilosos formados por diversas mineralogias e LL_c entre 20 e 80%.

5.1.4. Resultados para dados do B-01iv

Na tabela 5.11 são resumidos os dados agrupados para o grupo de dados B-01iv, formados pelos solos que possuem LL_c entre 80% e 500% e compostos por diversas mineralogias, tanto para os dados completos (43 amostras de solo) quanto para os dados filtrados (41 amostras de solo).

Tabela 5.11 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-01iv

	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	193,46	154,43	80,60	526,00	43
Dados filtrados	181,24	148,79	80,60	459,94	41

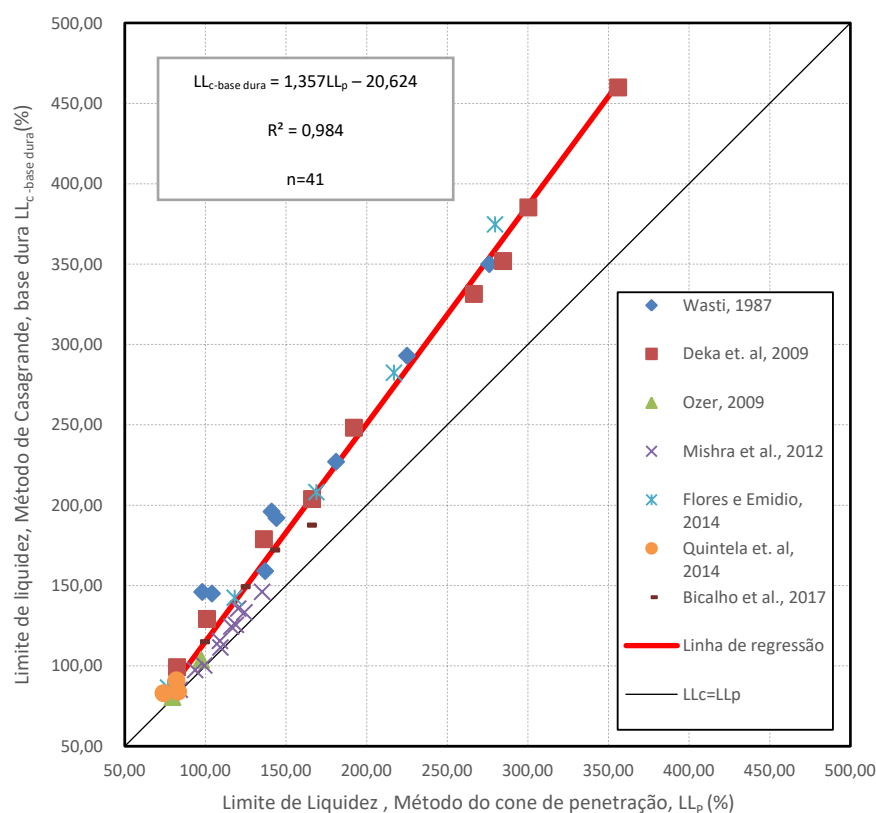
Fonte: Dados da pesquisa (2018).

5.1.4.1. Resultados

O gráfico da Figura 5.8 apresenta os pares de dados e a correlação avaliada (Equação 5.5) para os dados filtrados, sendo que o R^2 de 0,984 representa forte correlação entre os dados observados.

$$LL_{c-base} \quad dura \quad = \quad 1,357 \quad LL_p \quad - \quad 20,624 \quad (5.5)$$

Figura 5.8 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-01iv para 7 publicações após a exclusão dos outliers (n=41 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base\ dura}$ para solos argilosos com LL_c entre 80 e 460%



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Para as argilas formadas por diversas mineralogias e LL_c entre 80 e 460%, aproximadamente, verifica-se na Figura 5.8 que os resultados da Equação 5.5 foram próximos aos resultados da Equação 5.2, uma vez que os dados do B-01iv são praticamente os mesmos do B-01ii, pois os solos com alto valor de LL avaliados neste estudo, ou seja, que apresentam $LL > 80\%$, são formados por montmorilonitas. Assim, na Tabela 5.12 são comparados os resultados dos coeficientes determinados na Equação 5.5 com outras publicações prévias para mesma dureza da base do aparelho de Casagrande e mesmo intervalo de LL dos solos investigados (Wasti, 1987; Mishra et al., 2012; Bicalho et al., 2017) avaliadas no item 5.1.2 deste trabalho.

Tabela 5.12 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (BD-01iv) e outras correlações publicadas para $80\% < LL_c < 460\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base dura e cone britânico.

LL_p	$LL_c/LL_p (\times 100\%)$			
	Este trabalho - B-01iv	Wasti (1987)	Mishra et al. (2012)	Bicalho et al. (2017)
Intervalo de LL	80-460	145-526	70-150	100-160
80	109,92%	101,58%	101,45%	123,50%
100	115,08%	115,34%	104,92%	121,00%
150	121,95%	133,69%	109,55%	117,67%
200	125,39%	142,87%	-	-
250	127,45%	148,38%	-	-
300	128,83%	152,05%	-	-
350	129,81%	154,67%	-	-

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Verifica-se na Tabela 5.13 que os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t) indicam que os parâmetros da regressão são significantes em relação aos dados observados. O resultado do valor-p para os testes KS e DW para a amostra com dados filtrados mostram que o teste não é satisfatório, ou seja, os resíduos não possuem distribuição normal e não são independentes (valor-p menor que a significância de 5%).

Tabela 5.13 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-01iv.

Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	4,73E-05	Parâmetro significativo
Teste t (x)	2,00E-16	Parâmetro significativo
Teste F	2,20E-16	Parâmetro significativo
Teste KS	3,403E-08	Distribuição dos resíduos não é normal
Teste DW	6,147E-06	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Assim, apesar do R^2 alto (0,984), conclui-se que a correlação da Equação 5.5 não é válida para solos de diversas mineralogias com LL_c entre 80 e 460%, em função dos testes estatísticos dos resíduos. Ressalta-se que os resultados dos coeficientes da correlação obtida e dos testes estatísticos da Equação 5.5 foram muito próximos dos resultados da Equação 5.2 (ou seja, resultado para o B-01ii ou solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas). Não foi realizada nova filtragem dos

dados do B-01iv como foi feito no B-01ii, ou seja, aumentar o LL_c mínimo, uma vez que os dados dessa nova filtragem seriam idênticos aos dados da nova filtragem do B-01ii (Equação 5.3).

5.1.5. Conclusões parciais para o grupo de dados B-01

Neste capítulo foram apresentados os resultados e suas discussões para o B-01 a partir dos dados descritos no Capítulo 4. As análises entre os resultados dos ensaios de determinação de $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p , de acordo com a norma britânica, foram positivas para os subgrupos dos solos argilosos formados por montmorilonitas e para solos argilosos com diversas mineralogias com LL_c entre 20% e 80%, uma vez que as análises estatísticas mostraram normalidade e independência dos resíduos.

Verifica-se na correlação avaliada para caulinitas e ilitas que, apesar de ter apresentado resultados aproximados em relação à correlação previamente publicada por Spagnoli (2012), os testes estatísticos mostraram que o modelo não é válido, e, portanto, é necessário avaliar a influência da variabilidade dentro das famílias das caulinitas e das ilitas e do teor desses minerais nas correlações entre LL_c e LL_p . A correlação avaliada para solos argilosos com LL_c entre 20 e 80% sem mineralogia definida apresentou resultados próximos das publicações de Fojtová (2009), Di Matteo (2012) e Bicalho et al. (2017). A correlação avaliada para as montmorilonitas inicialmente foi verificada para intervalo de LL_c entre 50 e 460%. No entanto, como a verificação dos resíduos mostrou resultados insatisfatórios, foi realizada nova filtragem dos dados e os resultados investigados foram no intervalo de LL_c entre 115 e 460%. Os coeficientes determinados mostraram comportamento semelhante aos resultados das correlações previamente publicadas para as montmorilonitas por Wasti (1987) e Mishra et al. (2012), no entanto, as dispersões entre LL_c e LL_p apresentaram valores diferentes entre todas as correlações comparadas, uma vez que as correlações prévias foram definidas com diferentes misturas de solos com bentonitas. No caso do subgrupo dos solos argilosos de diversas mineralogias com LL_c entre 80% e 460% a correlação investigada não é válida, uma vez que os testes estatísticos foram insatisfatórios para normalidade e independência dos resíduos.

Foi possível verificar a influência da mineralogia nas correlações entre LL_c e LL_p . Ou seja, para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas LL_c é maior do que LL_p em até 28% no intervalo de LL_c entre 115 e 460%. Para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e ilitas LL_p é maior do que LL_c em até 5% aproximadamente. Além disso, os resultados mostraram que para solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas as diferenças entre LL_p e LL_c serão menores do que solos com quaisquer formações mineralógicas, para uma mesma faixa de valores de LL . Essa tendência foi observada também na comparação entre os resultados das publicações prévias para caulinitas e ilitas de Spagnoli (2012) e de argilas naturais de mineralogia não identificada (Wasti, 1987; Ozer, 2009; Fojtová, 2009).

5.2. RESULTADOS PARA DADOS DO BD-02

5.2.1. Resultados B-02i

A tabela 5.14 apresenta o resumo dos dados agrupados para o banco de dados B-02i, ou seja, solos com LL entre 30 e 60% formados essencialmente por caulinitas e as ilitas, para os dados completos e filtrados após a eliminação dos *outliers* (28 e 24 amostras de solo, respectivamente).

Tabela 5.14 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-02i

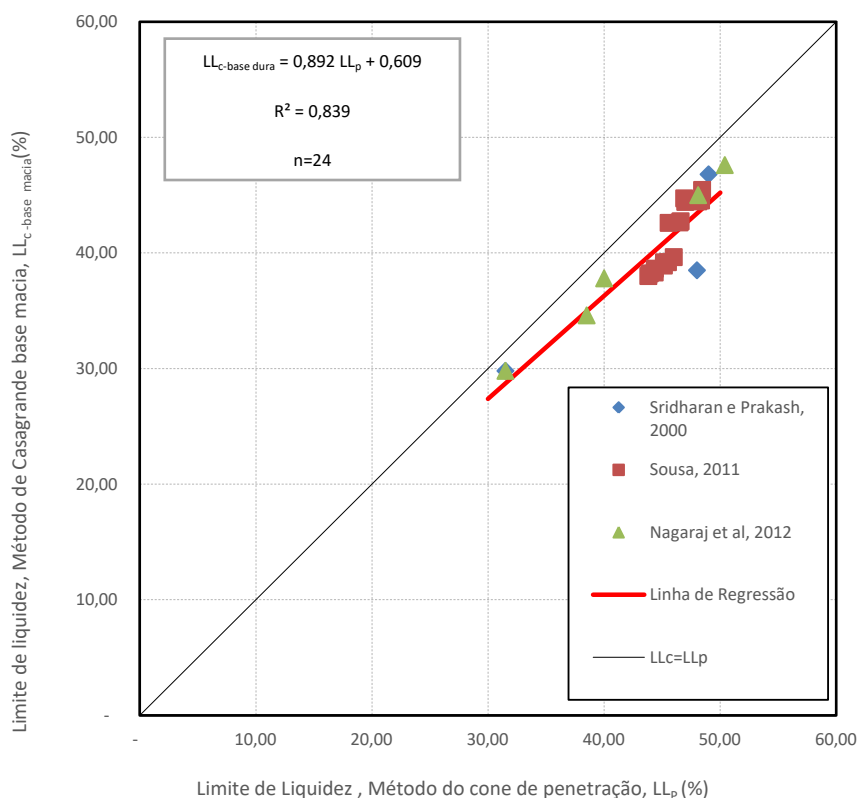
	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	42,16	45,12	29,80	65,6	28
Dados filtrados	40,48	44,70	29,80	47,6	24

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 5.9 apresenta os pares de dados e a correlação avaliada (Equação 5.7) para os dados filtrados com LL_c entre 30 e 50%, sendo que o R^2 de 0,839 pode ser considerado como forte.

$$LL_{c-base} \text{ macia} = 0,892 LL_p + 0,609 \quad (5.7)$$

Figura 5.9 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02i para 3 publicações após a exclusão dos outliers (n=24 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base \text{ macia}}$ para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e/ou ilitas.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Verifica-se na Figura 5.9 e na Tabela 5.15 que LL_p é até 10,60% maior do que LL_c , sendo que a dispersão diminui à medida que LL diminui, e que essa tendência está de acordo com as publicações prévias avaliadas que utilizaram aparelho à percussão de base macia e para argilas com mesma composição mineralógica de Sousa (2011) e contrária ao comportamento dos solos lateríticos formados por caulinitas de Queiroz de Carvalho (1986). Verifica-se na tabela 5.14 que as diferenças máximas entre LL_c e LL_p observadas na Equação 5.7 em relação às equações propostas por Sousa (2011) são menores do que as diferenças máximas observadas na correlação definida para solo formado principalmente por ilitas (solo 1) e maiores para solo com predominância de caulinitas (solo 2). Essas diferenças podem ser atribuídas ao fato de que as correlações de Sousa (2011) foram definidas

para solos argilosos de mesma origem geológica e em um curto intervalo de LL. Já a correlação de Queiroz de Carvalho (1986) foi definida com resultados de solos lateríticos que, segundo Dantas e Araújo (2014), são solos formados essencialmente por caulinitas e hidróxidos e óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio. Assim, nesse tipo peculiar de solo, a estabilidade das agregações em presença de água se dá pela combinação desses componentes, uma vez que o recobrimento dos argilo-minerais pelos hidróxidos e óxidos hidratados reduz a capacidade de adsorção de água pelos argilo-minerais e ainda atuam como agentes cimentantes naturais entre as partículas.

Tabela 5.15 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (BD-02i) e outras correlações publicadas para $30\% < LL_c < 50\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.

LL_p	$LL_p/LL_c (x100\%)$			
	Este trabalho - B-02i	Queiroz de Carvalho (1986)	Sousa (2011) - Solo 1	Sousa (2011) - Solo 2
Intervalo de LL_c	30-50	13-48	38-40	40-42
30	109,61%	116,10%	-	-
32	109,77%	115,49%	-	-
34	109,90%	114,96%	-	-
36	110,02%	114,49%	-	-
38	110,13%	114,07%	-	-
40	110,23%	113,70%	-	-
42	110,31%	-	-	-
44	110,39%	-	115,09%	-
46	110,47%	-	116,03%	107,49%
48	110,54%	-	-	107,61%
50	110,60%	-	-	107,71%

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Tabela 5.16 apresenta os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t), onde conclui-se que os parâmetros da regressão não são significantes em relação aos dados observados, uma vez que o valor-p obtido para o teste t (intercepto) é maior do que a significância de 5%. O resultado do teste SW para a amostra com dados filtrados mostra que os resíduos não apresentam distribuição normal, uma vez que o valor-p é inferior a significância de 5%. Ressalta-se que, neste caso, em função do tamanho da amostra, o teste KS não foi utilizado para avaliação da normalidade dos

resíduos. O resultado do teste DW mostrou que os resíduos não são independentes (valor- $p < \alpha$, com nível de significância de 95%).

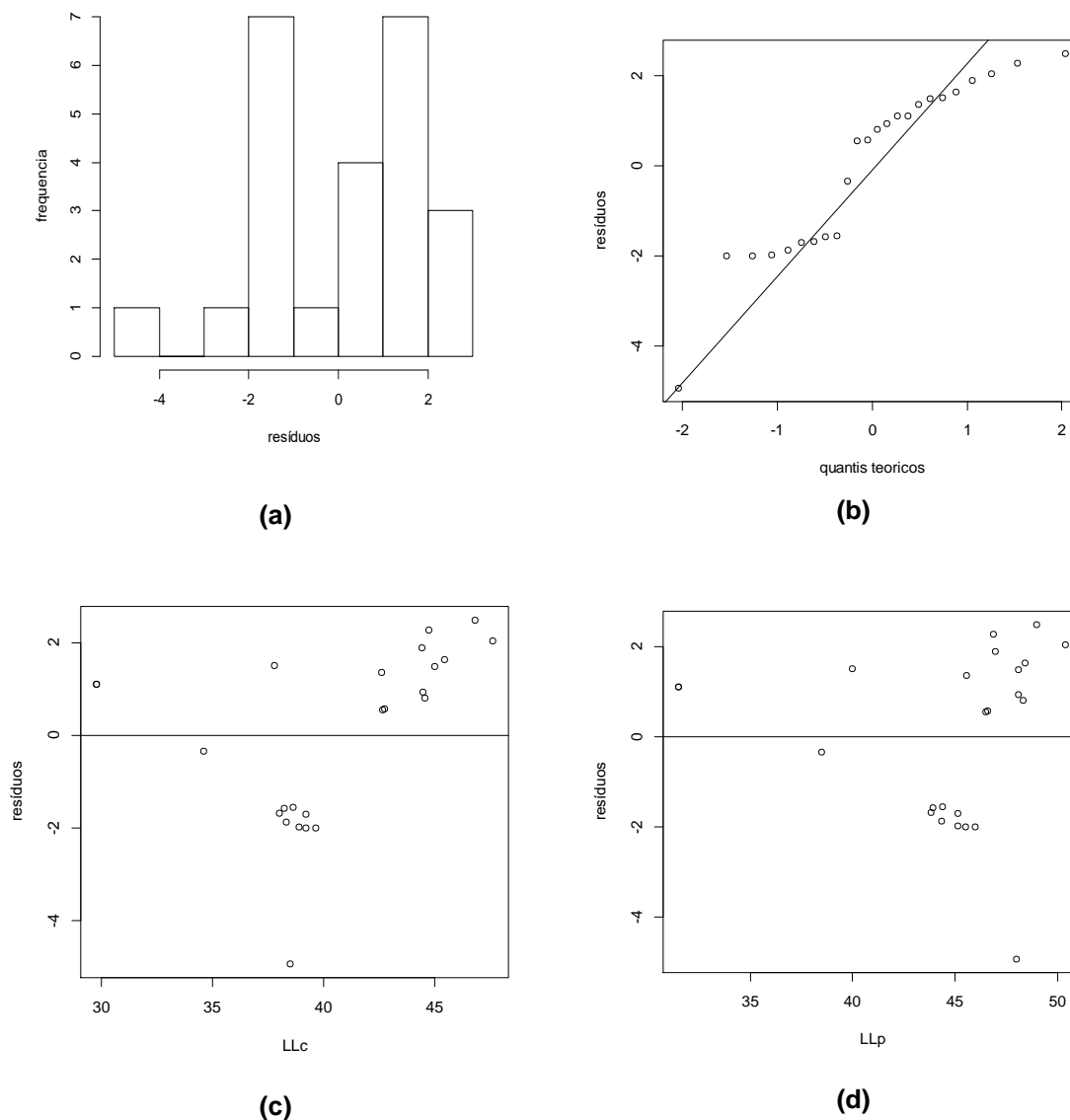
Tabela 5.16 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02i.

Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	0,872	Parâmetro não significativo
Teste t (x)	3,39E-10	Parâmetro significativo
Teste F	3,39E-10	Parâmetro significativo
Teste SW	0,01578	Distribuição dos resíduos não é Normal
Teste DW	0,084	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A avaliação gráfica dos resíduos, apresentada na Figura 5.10, confirma não tendência de normalidade pelo histograma divergindo do formato gaussiano (Figura 5.11a) e plotagem de probabilidade normal com formato diferente de reta (Figura 5.11b). Os gráficos de dispersão dos resíduos (Figuras 5.10c e 5.10d) indicam que há uma tendência de heterocedasticidade, uma vez que estes não se apresentam como uma faixa retangular e de baixa amplitude.

Figura 5.10 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-02i: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Conclui-se, a partir dos testes estatísticos e das análises gráficas dos resíduos, que os coeficientes determinados para regressão linear desses dados não são consistentes, apesar do valor de R^2 indicar forte correlação entre os dados observados. Ou seja, não foi possível determinar neste trabalho uma correlação entre LL_p e $LL_{c-base\ macia}$ para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e ilitas com LL entre 30 e 50%. Assim, uma amostra mais representativa se faz necessária no grupo B-02i para se encontrar coeficientes não tendenciosos.

5.2.2. Resultados BD-02ii

Verifica-se na Tabela 5.17 o resumo dos resultados agrupados para o grupo de dados B-02ii para 39 solos com LL_c aproximadamente entre 50 e 400%, sendo as montmorilonitas os minerais predominantes dessas argilas. Ressalta-se que para este subgrupo de dados não foi identificada a existência de *outliers*.

Tabela 5.17 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-02ii

	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	148,25	129,18	55,5	393,4	39

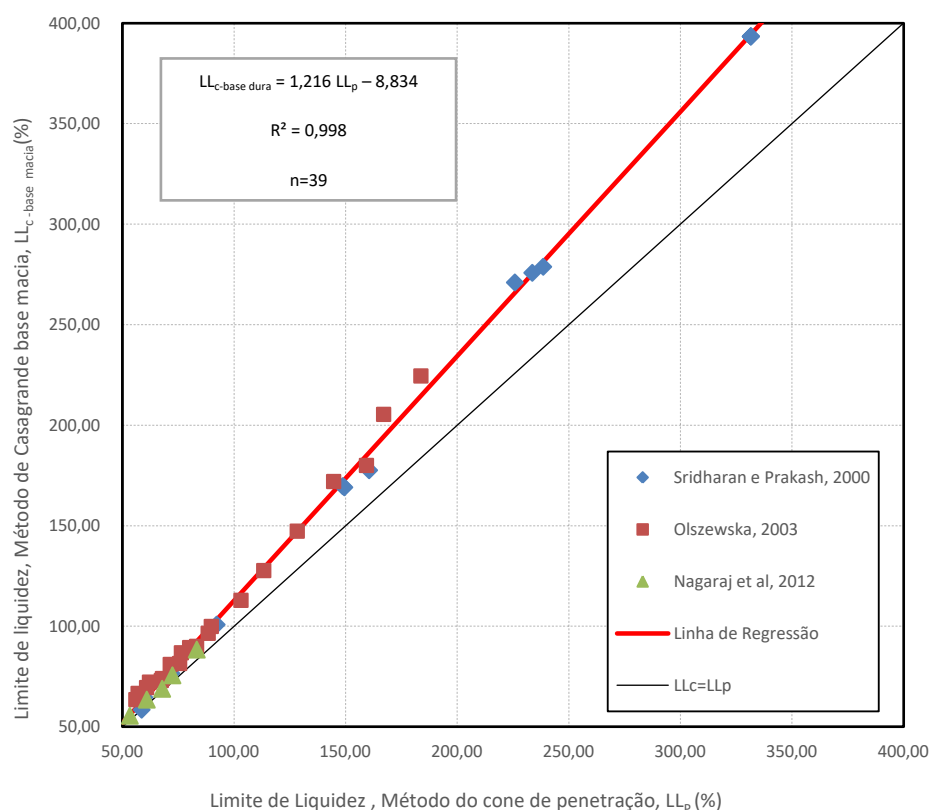
Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 5.11 apresenta os pares de dados e a correlação verificada (Equação 5.8) para os dados avaliados, sendo que o R^2 de 0,998 representa forte correlação entre os dados observados. Verifica-se que os resultados de LL_c foram até 19% maiores do que LL_p , sendo que essa diferença é atenuada à medida que LL diminui.

$$LL_{c-base} \quad macia \quad = \quad 1,216 \quad LL_p \quad - \quad 8,834 \quad (5.8)$$

A tabela 5.18 apresenta os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t), onde conclui-se que os parâmetros da regressão não são significantes em relação aos dados observados, uma vez que o Teste t (intercepto) não foi satisfatório. Os resultados dos testes KS e DW mostraram que os resíduos não possuem distribuição normal e não são independentes (valor-p menor que a significância de 5%).

Figura 5.11 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02ii para 3 publicações (n=41 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base\ macia}$ para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Tabela 5.18 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02ii.

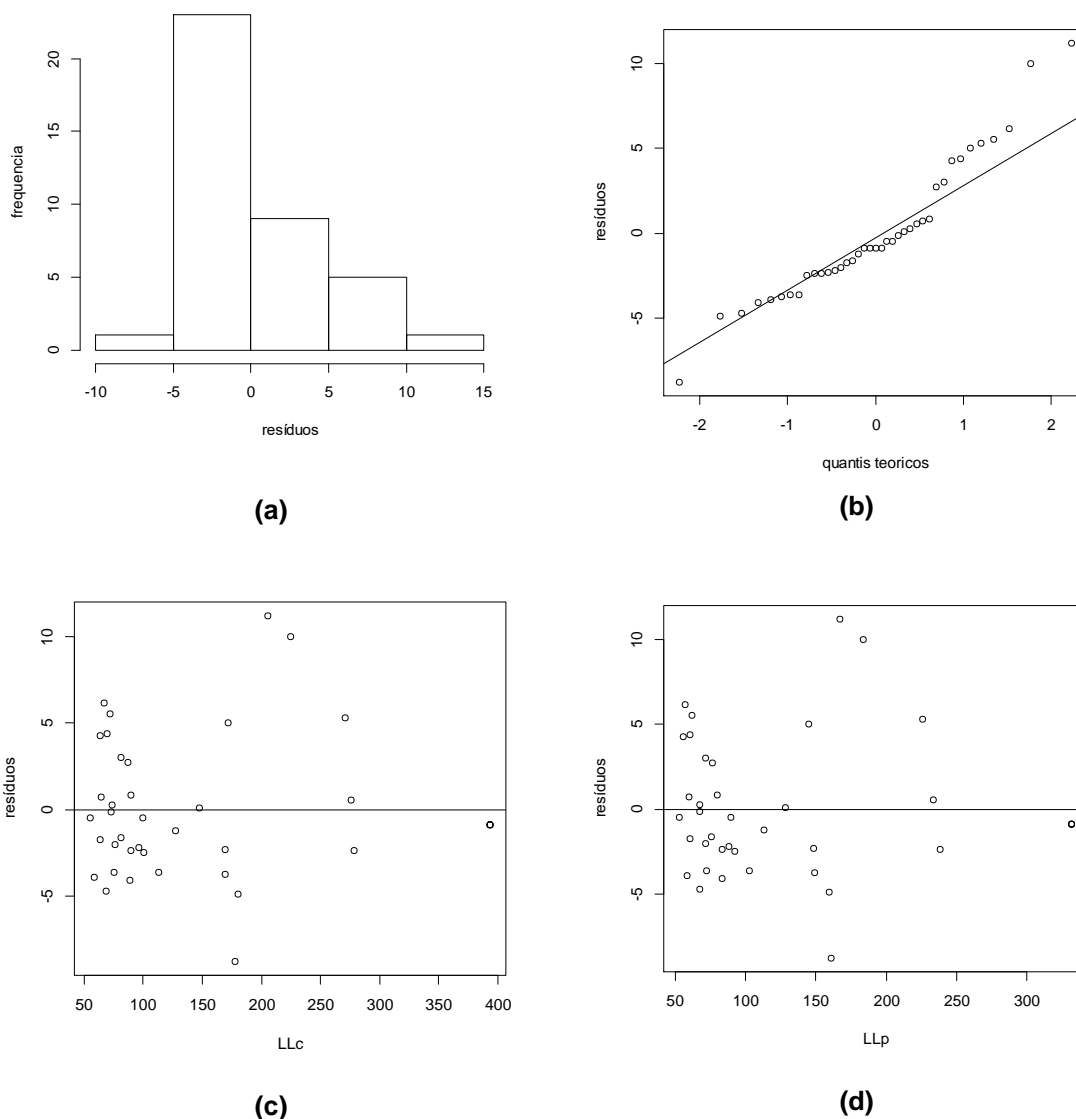
Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	0,172	Parâmetro não significante
Teste t (x)	1,01E-09	Parâmetro significativo
Teste F	1,01E-09	Parâmetro significativo
Teste KS	0,01325	Distribuição dos resíduos não é normal
Teste DW	0,03681	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A avaliação gráfica dos resíduos, apresentada na Figura 5.12, confirma parcialmente o resultado do teste KS, uma vez que o histograma não tende perfeitamente ao formato gaussiano (Figura 5.12a) e plotagem de probabilidade normal aproxima-se de uma reta em partes (Figura 5.12b). Os gráficos de dispersão dos resíduos

(Figuras 5.12c e 5.12d) confirmam os resultados do teste DW, ou seja, que os resíduos não são independentes, uma vez que a distribuição dos mesmos apresenta tendência cônica. Ainda nas Figuras 5.12c e 5.12d verifica-se que há uma tendência de heterocedasticidade, pois os resíduos não se apresentam como uma faixa retangular e de baixa amplitude.

Figura 5.12 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LL_p e LL_c – B-02ii: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LL_c ; (d) Dispersão dos resíduos - LL_p



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

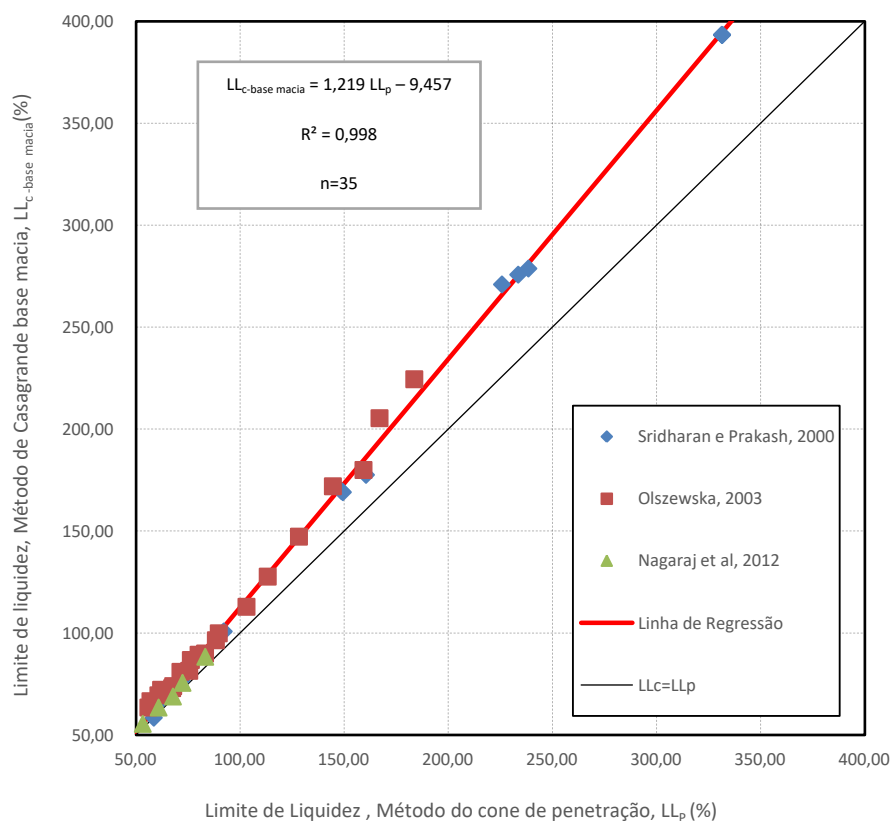
Similarmente ao critério adotado no B-01ii, no qual os resultados da Equação 5.2 não foram satisfatórios, realizou-se nova filtragem dos dados do B-02ii, ou seja, foram desconsiderados os resultados de solos argilosos com teor de montmorilonita menor do que 30%. Assim, foram desconsiderados quatro dados publicados por Olszewska (2003), cujas misturas de bentonitas (Montmorilonita Sódica) e argilas caulinitas apresentam teor de bentonita de 10% ou 20%. Assim, o resultado dos 35 pares de dados com LL_c entre 55,5% e 393,4% e média de 154,06%, dado pela Equação 5.9, apresentou R^2 (0,998) próximo em relação à análise anterior para o B-02ii.

$$LL_{c-base} \quad dura \quad = \quad 1,219 \quad LL_p \quad - \quad 9,457$$

(5.10)

Para as argilas formadas essencialmente por montmorilonitas, com LL_c entre 50 e 400%, aproximadamente, com teor de montmorilonita acima de 30%, a Figura 5.13 e Equação 5.10 apresentaram resultados de LL_c até 19% maiores do que LL_p , sendo que essa diferença é atenuada à medida que LL diminui (para LL_c igual a 50%, LL_c é aproximadamente 2,5% maior do que LL_p).

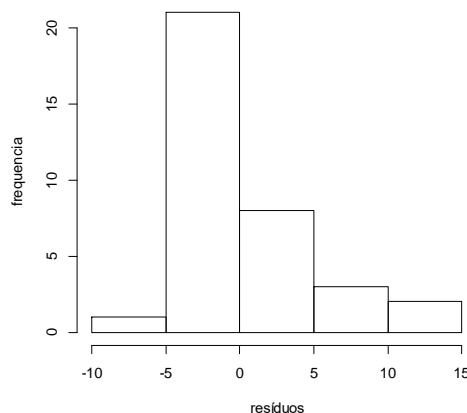
Figura 5.13 – Dispersão dos novos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02ii (n=35 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base\ dura}$ para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas com LL_c entre 50 e 400%.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Os testes estatísticos para a Equação 5.9 mostraram-se satisfatórios. Ou seja, os resultados do valor-p para os testes t e F foram menores do que a significância de 5% (3,06E-08, 2,0E-16 e 2,2E-16). A avaliação dos resíduos mostrou que o valor-p (9,515E-06) menor que a significância de 5% para o teste de aderência KS é insatisfatório, no entanto, a análise gráfica (Figura 5.14) com histograma próximo do formato gaussiano evidencia que os resíduos possuem distribuição normal. E, o valor-p (0,07737) do teste DW mostrou que os resíduos são independentes. Assim, conclui-se que a equação 5.9 é válida, no entanto deve ser utilizada com cautela, em função do resultado do teste KS. Ressalta-se que a Equação 5.9 foi definida para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas ($C > 30\%$), com LL_c entre 50 e 400%.

Figura 5.14 - Plotagem de Probabilidade Normal dos resíduos para os novos dados do B-02ii.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Na Tabela 5.19 são comparados os resultados dos coeficientes encontrados nas Equações 5.8 e 5.9 com a publicação prévia de Sridharan e Prakash (1998) para mesma dureza da base do aparelho de Casagrande, mesma mineralogia e LL_p dos solos investigados entre 33 e 84%, aproximadamente. Verifica-se que os resultados da Equação 5.9 foram muito próximos dos resultados da Equação 5.8, ou seja, a variação máxima entre LL_c e LL_p observada na Equação 5.9 é aproximadamente 0,12% maior que variação máxima observada na Equação 5.8. As correlações avaliadas no B-02ii apresentaram resultados próximos da publicação de Sridharan e Prakash (1998) no intervalo de LL_p entre 33 e 84%, com diferença entre LL_c e LL_p de aproximadamente 3% maior para a Equação 5.9 e 2,5% maior para a Equação 5.10.

Tabela 5.19 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (B-02ii) e outras correlações publicadas para $50\% < LL_c < 400\%$ ou $50\% < LL_p < 350\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.

LL_p	LL_c/LL_p (x100%)		
	Este trabalho (B-02ii, Equação 5.8)	Este trabalho (B-02ii, Equação 5.9)	Sridharan e Prakash (1998)
Intervalo LL_p	50-350	50-350	33-84
50	103,93%	102,99%	90,04%
60	106,88%	106,14%	102,90%
70	108,98%	108,39%	105,47%
80	110,56%	110,08%	107,40%
84	111,08%	110,64%	108,04%
90	111,78%	111,39%	-
100	112,77%	112,44%	-
150	115,71%	115,60%	-
200	117,18%	117,17%	-
250	118,07%	118,12%	-
300	118,66%	118,75%	-
350	119,08%	119,20%	-

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

5.2.3. Resultados B-02iii

Na Tabela 5.20 é apresentado o resumo dos dados definidos no grupo de dados B-02iii, ou seja, resultados de solos de diversas mineralogias com LL_c aproximadamente entre 30 e 60%, sendo 46 resultados dos dados completos e 45 dados filtrados.

Tabela 5.20 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-02iii

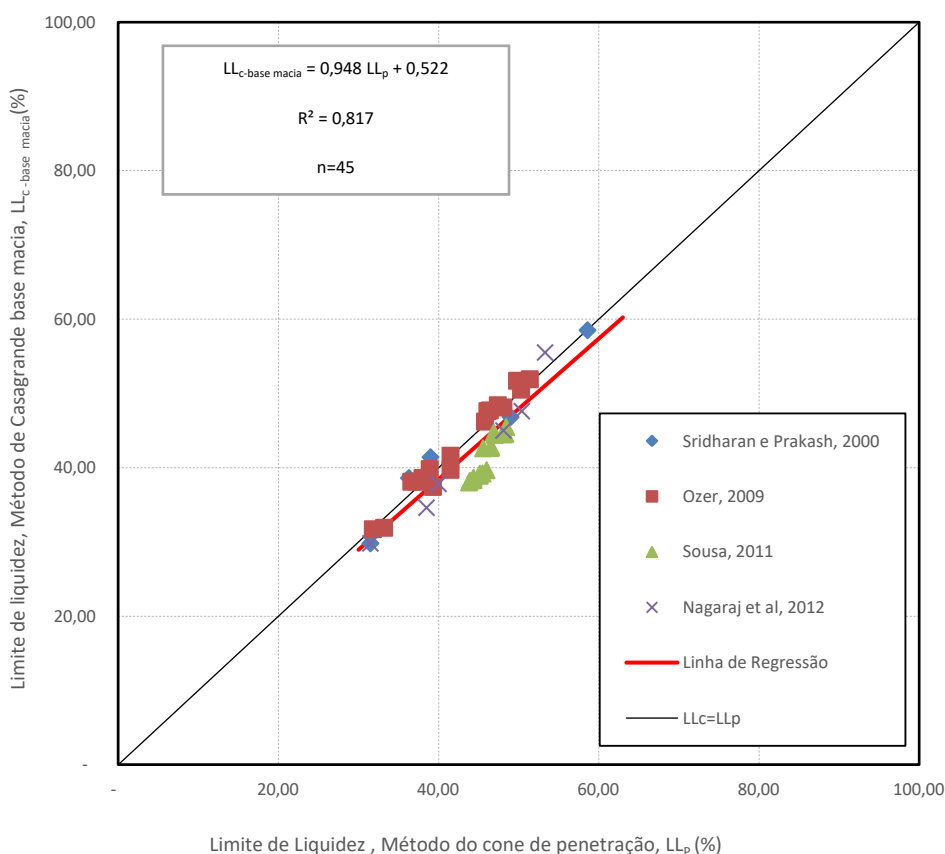
	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	42,03	43,96	29,80	58,5	46
Dados filtrados	42,10	43,87	29,80	58,5	45

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 5.15 apresenta os pares de dados e a correlação avaliada (Equação 5.10) para os dados filtrados com LL_c entre 30 e 60%, sendo que o R^2 de 0,817 pode ser considerado como forte correlação entre os dados.

$$LL_{c-base} \text{ macia} = 0,948 LL_p + 0,522 \quad (5.10)$$

Figura 5.15 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02iii para 4 publicações após a exclusão dos outliers (n=45 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base} \text{ macia}$ para solos argilosos com LL_c entre 30 e 60%.



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Verifica-se na Figura 5.15 e na Tabela 5.21 que LL_p é até 4,50% aproximadamente maior do que LL_c , sendo que a dispersão diminui à medida que LL diminui, e que essa tendência não está de acordo com as publicações prévias avaliadas que utilizaram aparelho à percussão de base macia e para argilas com LL entre 30 e 60% (Budhu, 1985; Queiroz de Carvalho, 1986; Sridharan e Prakash, 1998). Ou

seja, nas publicações prévias a dispersão entre LL_p e LL_c diminui à medida que LL aumenta. Essa diferença de comportamento pode ser atribuída à diferença da mineralogia dos solos avaliados nas correlações: Queiroz de Carvalho (1986) e Sridharan e Prakash (1998) investigaram dados de solos formados apenas por caulinitas e caulinitas e montmorilonitas, respectivamente; na publicação Budhu (1985) não foi especificada a mineralogia dos solos investigados; e a Equação 5.10 foi definida a partir de solos com diferentes mineralogias, como caulinitas, ilitas, montmorilonitas, além dos resultados de Ozer (2009) com mineralogia não especificada.

Tabela 5.21 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (BD-02iii) e outras correlações publicadas para $30\% < LL_p < 60\%$. Ensaios com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.

LL_p	$LL_p/LL_c (x100\%)$			
	Este trabalho (B-02iii)	Budhu (1985)	Queiroz de Carvalho (1986)	Sridharan e Prakash (1998)
Intervalo LL_p	30-60	20-100	13-48	35-84
30	103,58%	108,03%	116,10%	-
32	103,70%	106,99%	115,49%	-
34	103,80%	106,09%	114,96%	-
36	103,90%	105,31%	114,49%	110,01%
38	103,98%	104,62%	114,07%	108,13%
40	104,05%	104,00%	113,70%	106,50%
46	104,24%	102,51%	112,79%	102,65%
48	104,29%	102,10%	112,54%	101,63%
60	104,53%	100,27%	-	97,18%

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Verifica-se na Tabela 5.22 que os resultados dos testes estatísticos são insatisfatórios para o teste t no intercepto (valor-p é maior do que a significância de 5%) e para os testes dos resíduos KS e DW, ou seja, os resíduos não apresentam distribuição normal e não são independentes (valor-p é inferior a significância de 5%).

Tabela 5.22 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02iii.

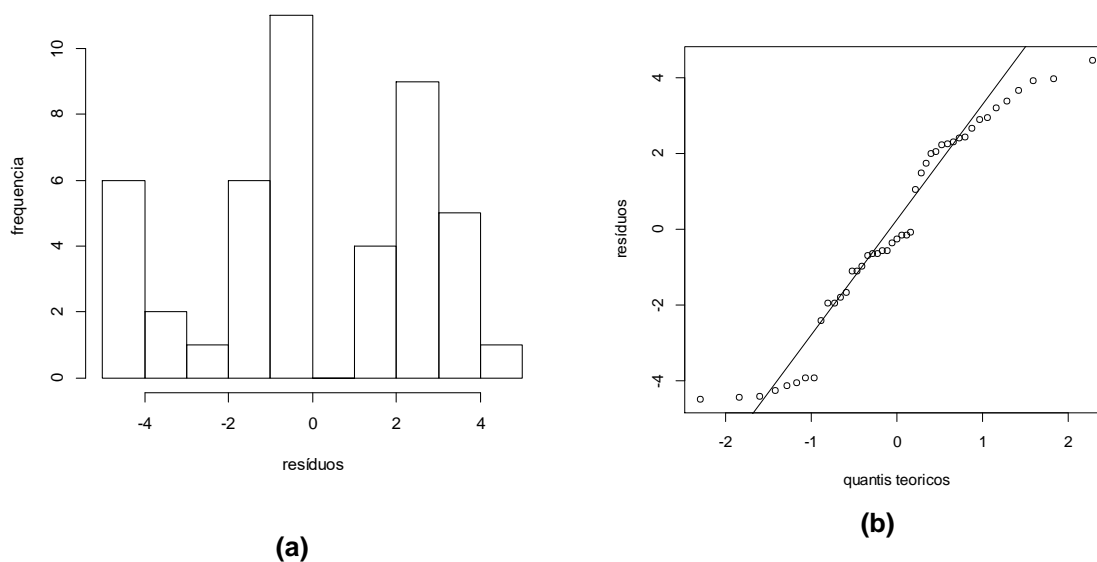
Teste	valor-p	Conclusão
-------	---------	-----------

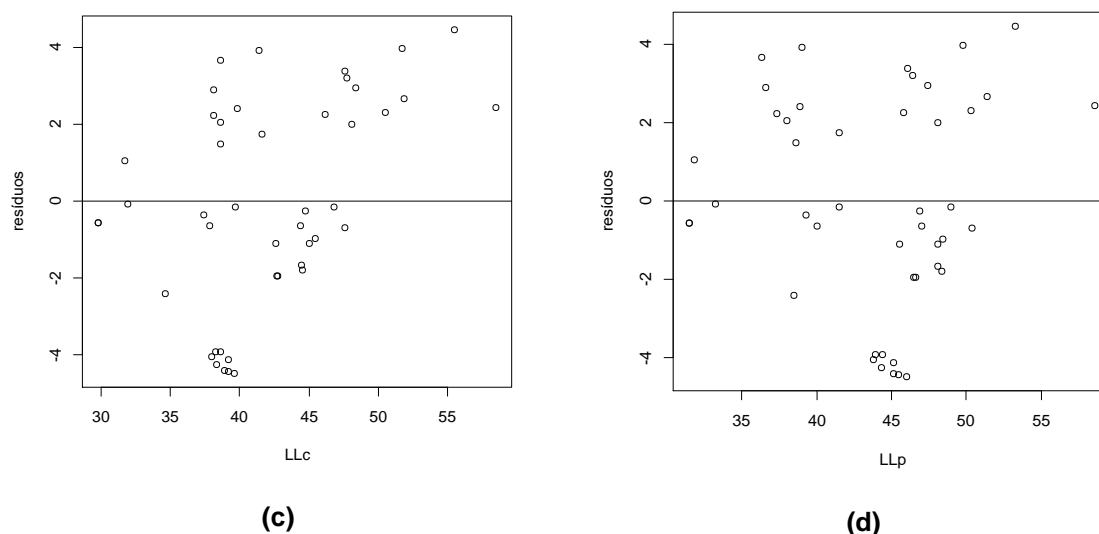
Teste t (intercepto)	0,864	Parâmetro não significativa
Teste t (x)	2,0E-16	Parâmetro significativa
Teste F	2,2E-16	Parâmetro significativa
Teste KS	7,42E-05	Distribuição dos resíduos não é Normal
Teste DW	4,63E-10	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A avaliação gráfica dos resíduos, apresentada na Figura 5.16, confirma não tendência de normalidade pelo histograma divergindo do formato gaussiano (Figura 5.16a) e plotagem de probabilidade normal com formato diferente de reta (Figura 5.16b). Os gráficos de dispersão dos resíduos (Figuras 5.16c e 5.16d) indicam que há uma tendência de heterocedasticidade, uma vez que estes não se apresentam como uma faixa retangular e de baixa amplitude.

Figura 5.16 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LLp e LLc – B-02iii: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LLc; (d) Dispersão dos resíduos - LLp





Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Conclui-se, a partir dos testes estatísticos e das análises gráficas dos resíduos, que os coeficientes encontrados para regressão desses dados não são consistentes, apesar do valor de R^2 indicar forte correlação entre os dados observados. Ou seja, não foi possível determinar neste trabalho uma correlação entre LL_p e LL_{c-base} macia para solos argilosos com LL entre 30 e 60%.

5.2.4. Resultados BD-02iv

Verifica-se na Tabela 5.23 o resumo dos resultados agrupados no banco de dados B-02iv para os 53 solos formados por diversas mineralogias e com LL_c aproximadamente entre 60 e 400%. Ressalta-se que para este subgrupo de dados não foi identificada a existência de *outliers*.

Tabela 5.23 - Resumo dos resultados de LL_p e LL_c avaliados no B-02iv

	LL_c médio (%)	LL_p médio (%)	LL_c mínimo (%)	LL_c máximo (%)	n
Dados completos	127,68	112,62	60,50	393,4	53

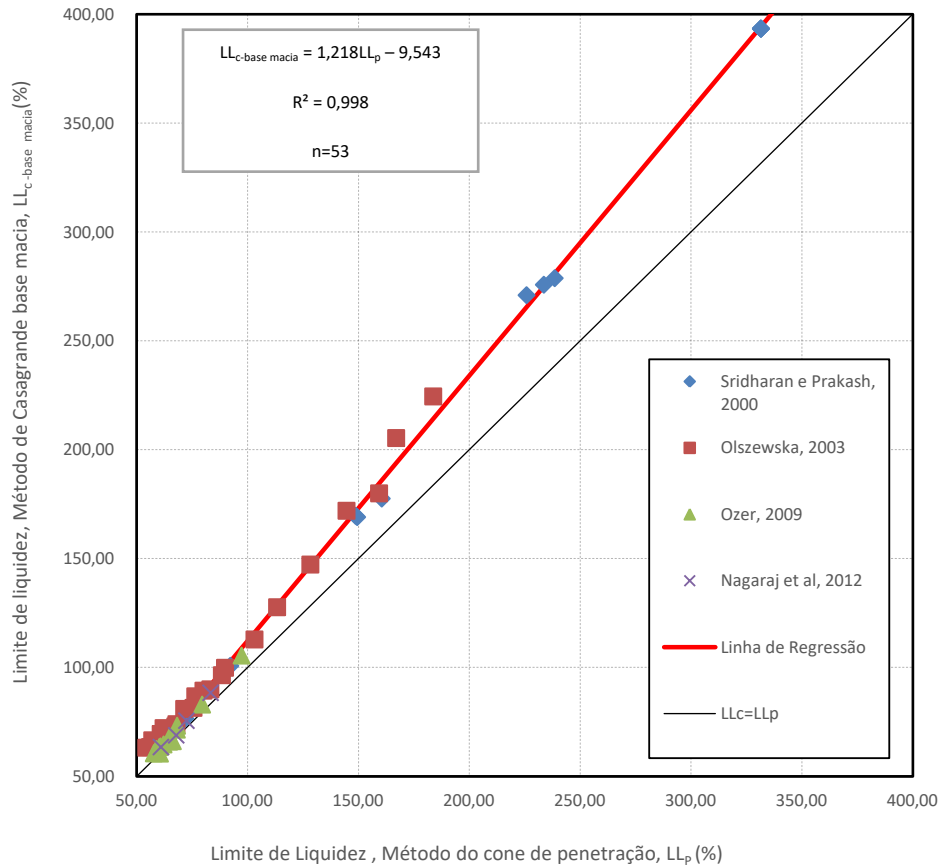
Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A Figura 5.17 apresenta os pares de dados e a correlação verificada (Equação 5.11) para os dados avaliados, sendo que o R^2 de 0,998 representa forte correlação entre os dados observados. Para as argilas de diferentes mineralogias com LL_c entre 60 e 400%, verifica-se que os resultados foram parecidos com a Equação 5.9, ou seja, apresentou resultados de LL_c até 19,00% maiores do que LL_p , sendo que essa diferença é atenuada à medida que LL diminui.

$$LL_{c-base\ macia} = 1,218LL_p - 9,543 \quad (5.11)$$

A tabela 5.24 apresenta os resultados dos testes de hipóteses (Testes F e t), onde conclui-se que os parâmetros da regressão são significantes em relação aos dados observados. Os resultados dos testes KS e DW mostraram que os resíduos não possuem distribuição normal e não são independentes (valor-p menor que a significância de 5%).

Figura 5.17 – Dispersão dos dados dos solos avaliados no subgrupo B-02iv para 4 publicações (n=53 amostras ensaiadas) e correlação entre LL_p - $LL_{c-base\ macia}$ para solos argilosos com $60\% < LL_c < 400\%$.



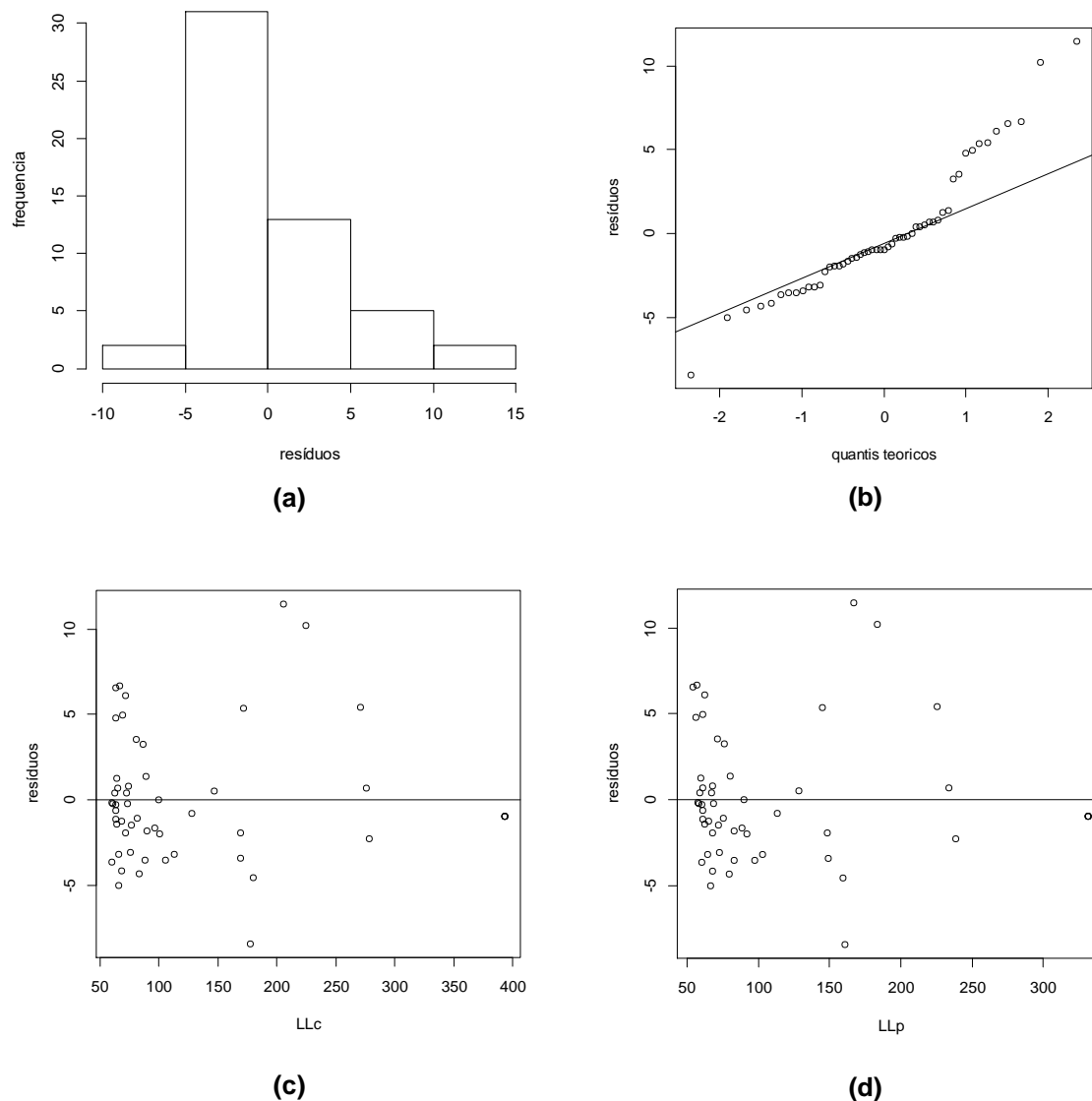
Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Tabela 5.24 - Resumo dos resultados dos testes estatísticos – B-02iv.

Teste	valor-p	Conclusão
Teste t (intercepto)	5,75E-14	Parâmetro significativo
Teste t (x)	2,00E-16	Parâmetro significativo
Teste F	2,20E-16	Parâmetro significativo
Teste KS	5,593E-06	Distribuição dos resíduos não é normal
Teste DW	0,008573	Resíduos não são independentes

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

Figura 5.18 - Avaliação dos resíduos de resultados entre LL_p e LL_c – B-02iv: (a) Histograma; (b) Plotagem de Probabilidade Normal; (c) Dispersão dos resíduos – LL_c ; (d) Dispersão dos resíduos – LL_p



Fonte: Dados da pesquisa (2018).

A avaliação gráfica dos resíduos, apresentada na Figura 5.18, confronta parcialmente o resultado do teste KS, uma vez que se verifica alguma tendência ao formato gaussiano no histograma (Figura 5.18a) e plotagem de probabilidade normal parcialmente aproximando-se de uma reta (Figura 5.18b). Os gráficos de dispersão dos resíduos (Figuras 5.18c e 5.18d) confirmam os resultados do teste DW, uma vez que a distribuição dos mesmos apresenta uma tendência. Ainda nas Figuras 5.18c e 5.18d verifica-se que há uma tendência de heterocedasticidade, pois os resíduos não se apresentam como uma faixa retangular e de baixa amplitude. Assim, conclui-

se que a equação 5.11 não é válida, em função da verificação da normalidade e da independência dos resíduos.

Na Tabela 5.25 são comparados os resultados dos coeficientes encontrados na Equação 5.11 com as publicações prévias de Budhu (1985) e Sridharan e Prakash (1998) para LL_p de até 100% e 84%, respectivamente. A correlação avaliada no B-02iv apresentou resultados próximos da publicação de Sridharan e Prakash (1998) no intervalo de LL_p entre 33 e 84%, com diferença máxima entre LL_c e LL_p aproximadamente 2% maior quando LL_p é igual a 84%. Em relação à correlação proposta por Budhu (1985), os resultados da Equação 5.13 apresentaram dispersão máxima entre LL_c e LL_p até 10% maiores, quando LL_p é igual a 100%. Verifica-se ainda que os resultados da Equação 5.11 foram muito próximos dos resultados da Equação 5.9, ou seja, a variação máxima entre LL_c e LL_p observada na Equação 5.13 é aproximadamente 0,13% menor que variação máxima observada na Equação 5.13.

Tabela 5.25 - Comparação entre correlações lineares entre LL_p e LL_c : este trabalho (B-02iv) e outras correlações publicadas para $50\% < LL_c < 400\%$ ou $50\% < LL_p < 350\%$. Ensaio com aparelho de Casagrande de base macia e cone britânico.

LL_p	$LL_c/LL_p (x100\%)$		
	Este trabalho (B-02iv)	Budhu (1985)	Sridharan e Prakash (1998)
Intervalo LL_p	60-350	20-100	33-84
60	105,90%	99,74%	102,90%
84	110,44%	101,78%	108,04%
100	112,26%	102,60%	-
150	115,44%	-	-
200	117,03%	-	-
300	118,62%	-	-
350	119,07%	-	-

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

5.2.5. Conclusões parciais para o grupo de dados B-02

Neste capítulo foram apresentados os resultados e suas discussões para o B-02 a partir dos dados descritos no Capítulo 4. As análises entre os resultados de $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p (de acordo com a norma britânica), foram positivas apenas para o subgrupo dos solos argilosos formados por montmorilonitas (B-02ii), uma vez que as análises estatísticas mostraram normalidade e independência dos resíduos.

Na correlação determinada para caulinitas e ilitas os testes estatísticos mostraram que o modelo não é válido, sendo necessária uma amostra mais representativa de dados para definir o modelo para esse grupo. A correlação avaliada para solos argilosos com LL_c entre 30 e 60% sem mineralogia definida, inválida em função da análise dos resíduos, apresentou comportamento diferente das publicações prévias avaliadas com $LL_{c-base\ macia}$ (Budhu, 1985; Queiroz de Carvalho, 1986; Sridharan e Prakash, 1998). Essa diferença de comportamento pode ser atribuída à diferença da mineralogia dos solos avaliados nas correlações. A correlação avaliada para as montmorilonitas ($C > 30\%$) para intervalo de LL_c entre 50 e 400% apresentou resultados satisfatórios e próximos da publicação de Sridharan e Prakash (1998), determinada com solos de mesma mineralogia, porém deve ser utilizada com cautela, uma vez que a equação foi aceita segundo a análise do histograma para normalidade dos resíduos. No caso do subgrupo dos solos argilosos de diversas mineralogias com LL_c entre 60% e 400% a correlação investigada não é válida, uma vez que os testes estatísticos foram insatisfatórios para normalidade e independência dos resíduos.

Procurou-se avaliar neste trabalho a influência da mineralogia nas correlações entre $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p . Ou seja, para solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas $LL_{c-base\ macia}$ é maior do que LL_p em até 19% no intervalo de LL_c entre 50 e 400%. Para solos argilosos formados essencialmente por caulinitas e ilitas LL_p é maior do que LL_c em até 10% aproximadamente. Além disso, ao contrário dos resultados para $LL_{c-base\ dura}$ os resultados mostraram que para solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas as diferenças entre LL_p e LL_c serão maiores do que solos com quaisquer formações mineralógicas, para uma mesma faixa de

valores de LL. No entanto, como as correlações avaliadas são inválidas em função dos testes dos resíduos, essa tendência não pode ser confirmada neste estudo.

5.3. RESUMO DOS RESULTADOS DAS CORRELAÇÕES AVALIADAS NO B-01 E NO B-02

Na Tabela 5.26 são resumidas as correlações avaliadas para os grupos de dados B-01 e B-02 nos itens 5.1 e 5.2 deste trabalho. Verifica-se que as Equações 1, 2, 5, 6 e 7 são inválidas segundo os resultados dos testes estatísticos. As Equações 3, 4 e 8 são válidas, no entanto as duas últimas devem ser utilizadas com cautela, em função dos resultados insatisfatórios dos testes dos resíduos.

Tabela 5.26 - Resumo dos resultados das correlações avaliadas neste trabalho para cada banco de dados.

Banco de dados	Variação de LL (%)	Mineralogia	Equação	Correlação	Conclusão
BD-01i	20-100	Caulinitas e Ilitas	Eq. 1	$LL_{c-base\ dura} = 1,015 LL_p - 1,367$	Inválida
BD-01ii	115-460	Montmorilonitas	Eq. 2	$LL_{c-base\ dura} = 1,352 LL_p - 19,633$	Válida
BD-01iii	20-80	Diversas	Eq. 3	$LL_{c-base\ dura} = 1,283 LL_p - 1,472$	Válida*
BD-01iv	80-460	Diversas	Eq. 4	$LL_{c-base\ dura} = 1,021 LL_p - 2,518$	Inválida
BD-02i	30-50	Caulinitas e Ilitas	Eq. 5	$LL_{c-base\ dura} = 1,357 LL_p - 20,624$	Inválida
BD-02ii	50-400	Montmorilonitas	Eq. 6	$LL_{c-base\ macia} = 0,892 LL_p + 0,609$	Válida*
BD-02iii	30-60	Diversas	Eq. 7	$LL_{c-base\ macia} = 1,216 LL_p - 8,834$	Inválida
BD-02iv	60-400	Diversas	Eq. 8	$LL_{c-base\ dura} = 1,219 LL_p - 9,457$	Inválida

*utilizar com cautela

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

5.4. AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DUREZA DA BASE DO APARELHO DE CASAGRANDE NAS CORRELAÇÕES ENTRE LL_p E LL_c

Na Tabela 5.27 é avaliada a influência da dureza da base do aparelho de Casagrande a partir dos resultados $LL_{c-base\ dura}$ e $LL_{c-base\ macia}$ das correlações determinadas neste trabalho, conforme apresentado na Tabela 5.26. Verifica-se que os valores de $LL_{c-base\ dura}$ foram maiores em relação ao $LL_{c-base\ macia}$ na maior parte dos resultados, ao contrário do advertido por Ozer (2009) e Haigh (2015), ou seja, que o valor de $LL_{c-base\ macia}$ seria sempre maior do que $LL_{c-base\ dura}$. No entanto, como foram comparadas correlações inválidas segundo os testes estatísticos, essa tendência não pode ser confirmada neste estudo, exceto na comparação entre as Equações 2 e 6, ambas válidas para as montmorilonitas. As Equações 2 e 6 foram comparadas no intervalo de $115\% < LL_c < 400\%$, onde $LL_{c-base\ dura}$ é maior do que $LL_{c-base\ macia}$, e verifica-se que essa diferença diminui com o aumento de LL. Assim, é necessário um estudo mais detalhado para verificação da influência da dureza da base por mineralogia ou por faixa de valor de LL dos solos argilosos, uma vez que Ozer (2009) e Haigh (2015), investigaram a influência da dureza da base para solos com LL de até 100%.

Tabela 5.27 - Pares de valores $LL_{c-base\ dura}$ e $LL_{c-base\ macia}$ obtidos de acordo com as Equações avaliadas neste trabalho

	LL_p (%)	LL_c (%)		$LL_{c-base\ dura} /$ $LL_{c-base\ macia}$ (%)
		$LL_{c-base\ dura}$	$LL_{c-base\ macia}$	
Caulinitas e Ilitas	30	29,083	27,369	106,26%
	40	39,233	36,289	108,11%
	50	49,383	45,209	109,23%
Montmorilonita	115	146,073	130,728	111,74%
	130	165,318	149,013	110,94%
	150	190,978	173,393	110,14%
	200	255,128	234,343	108,87%
	250	319,278	295,293	108,12%
	300	383,428	356,243	107,63%
	350	447,578	417,193	107,28%
	400	511,728	478,143	107,02%
$30 < LL_c < 400\%$	30	28,112	26,997	104,13%
	40	38,322	39,177	97,82%
	50	48,532	51,357	94,50%
	60	58,742	63,537	92,45%
	80	87,936	87,897	100,04%
	100	115,076	112,257	102,51%
	150	182,926	173,157	105,64%
	200	250,776	234,057	107,14%
	250	318,626	294,957	108,02%

300	386,476	355,857	108,60%
350	454,326	416,757	109,01%
400	522,176	477,657	109,32%

Fonte: Dados da pesquisa (2018).

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Nesta dissertação procurou-se destacar a importância de especificar o procedimento e equipamento utilizado para determinar o limite de liquidez de um solo coesivo pelos métodos de Casagrande e do cone, bem como os fatores que influenciam nas diferenças entre os resultados obtidos pelos dois métodos. Assim, investigaram-se correlações lineares entre os resultados de LL_c e LL_p para solos argilosos de distintas mineralogias e diferentes equipamentos.

Foi destacada a importância da dureza da base do Aparelho de Casagrande, conhecido como método de percussão, utilizado para determinação do LL_c . Assim, verificaram-se as metodologias para obtenção dos resultados publicados e investigados neste trabalho (Wasti, 1987; Sridharan e Prakash, 2000; Silveira, 2001; Olszewska, 2003; Fojtová et al., 2009; Ozer, 2009; Deka et al., 2009; Sousa, 2011; Di Matteo, 2012; Mishra et al., 2012; Nagaraj et al., 2012; Spagnoli, 2012; Flores e Emidio, 2014; Quintela et al., 2014 e Bicalho et al., 2017). Os resultados experimentais dos ensaios de determinação de LL_c , ou seja, pelo método de percussão, foram inicialmente separados de acordo com a dureza da base do aparelho de Casagrande em dois grupos: B-01 (aparelho de Casagrande base dura) e B-02 (aparelho de Casagrande de base macia). Posteriormente, foram criados oito subgrupos de acordo com o valor de LL e a mineralogia dos solos investigados: B-01i (solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas), B-01ii (solos formados essencialmente por montmorilonitas), B-01iii (solos com $LL_c < 80\%$), B-01iv (solos com $LL_c < 80\%$), B-02i (solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas), B-02ii (solos formados essencialmente por montmorilonitas), B-02iii (solos com $LL_c < 60\%$) e B-02iv (solos com $LL_c < 60\%$).

Foram determinadas correlações entre LL_c e LL_p para cada sub-grupo através da regressão linear e os testes dos resíduos mostraram que algumas correlações não são válidas ou devem ser utilizadas com cautela, apesar dos elevados valores do coeficiente de determinação, R^2 . Ou seja, verificou-se que o R^2 não é um parâmetro confiável para tomada de decisão quanto à aceitação do modelo determinado. Concluiu-se que as correlações entre LL_c e LL_p dependem da mineralogia e do valor de LL dos solos ensaiados, bem como da especificação do aparelho utilizado.

Procurou-se avaliar a influência da dureza da base no valor de LL_c . Verificou-se que os resultados de $LL_{c-base\ dura}$ foram maiores que $LL_{c-base\ macia}$ para as montmorilonitas, ao contrário do advertido por Ozer (2009) e Haigh (2015), ou seja, que os resultados de $LL_{c-base\ dura}$ seriam sempre menores que $LL_{c-base\ macia}$. Dessa forma, foi indicada a necessidade de um estudo mais detalhado para verificação da influência da dureza da base por mineralogia ou por faixa de valor de LL dos solos argilosos, uma vez que Ozer (2009) e Haigh (2015), investigaram esta influência para solos com LL de até 100%.

A seguir são apresentadas as conclusões específicas das correlações entre $LL_{c-base\ dura} - LL_p$ e $LL_{c-base\ macia} - LL_p$.

6.1.1. $LL_{c-base\ dura} - LL_p$

As análises entre os resultados dos ensaios de determinação de $LL_{c-base\ dura}$ e LL_p , de acordo com a norma britânica, foram positivas para os subgrupos dos solos argilosos formados por montmorilonitas e para solos argilosos com diversas mineralogias com LL_c entre 20% e 80%, uma vez que as análises estatísticas mostraram normalidade e independência dos resíduos.

Devido ao extenso banco de dados de resultados de $LL_{c-base\ dura}$ essas correlações são mais numerosas na literatura e foram publicadas para diversas mineralogias e intervalos de valores de LL. Assim, foi possível comparar os resultados determinados neste trabalho com as correlações previamente publicadas. Verifica-se na correlação avaliada para caulinitas e ilitas que, apesar de ter apresentado resultados parecidos com a correlação publicada por Spagnoli (2012), os testes

estatísticos mostraram que o modelo não é válido, e, portanto, é necessário avaliar a influência do teor de caulinitas e de ilitas e da variabilidade dentro das famílias desses minerais nas correlações entre LL_c e LL_p . A correlação avaliada para solos argilosos com LL_c entre 20 e 80%, sem mineralogia definida, apresentou resultados próximos das publicações de Fojtová (2009), Di Matteo (2012) e Bicalho et al. (2017). Os resultados da correlação avaliada para as montmorilonitas, no intervalo de LL_c entre 115 e 460%, mostraram comportamento semelhante das correlações previamente publicadas para as montmorilonitas por Wasti (1987), Mishra et al. (2012) e Bicalho et al. (2017), no entanto, as dispersões entre LL_c e LL_p apresentaram valores diferentes entre todas as correlações comparadas. Essas diferenças podem ser explicadas pelo fato de que a equação foi definida neste estudo a partir de resultados com solos compostos por montmorilonita de forma geral, ou seja, foram utilizados os dados de misturas com diferentes proporções ($C > 30\%$) de solos argilosos e bentonitas e areias e bentonitas. A correlação de Wasti (1987) foi definida somente a partir de dados de misturas de solos argilosos e bentonitas em diversas proporções, enquanto a correlação de Mishra et al. (2012) foi definida a partir de misturas de solos argilosos e diferentes bentonitas, com mesma proporção (20% de bentonita). A correlação proposta por Bicalho et al. (2017) foi determinada com resultados de misturas de areias e bentonitas em diversas proporções ($C > 60\%$). Além disso, não foi possível verificar neste estudo o processo de hidratação das bentonitas, que pode influenciar nas diferenças entre LL_c e LL_p . Por fim, no subgrupo dos solos argilosos de diversas mineralogias com LL_c entre 80% e 460% a correlação investigada não é válida, uma vez que os testes estatísticos foram insatisfatórios para normalidade e independência dos resíduos.

Procurou-se verificar a influência da mineralogia nas correlações entre LL_c e LL_p . No sub-grupo das montmorilonitas, no intervalo de LL_c entre 115 e 460%, LL_c é maior do que LL_p em até 28%. Já para as caulinitas e ilitas LL_p é maior do que LL_c em até 5%. Os resultados mostraram ainda que para solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas as diferenças entre LL_p e LL_c são menores do que solos com quaisquer formações mineralógicas, para uma mesma faixa de valores de LL . Essa tendência foi observada também na comparação entre as publicações prévias para caulinitas e ilitas de Spagnoli (2012) e de argilas naturais de mineralogia não identificada (Wasti, 1987; Ozer, 2009; Fojtová, 2009).

6.1.2. $LL_{c-base\ macia} - LL_p$

As análises entre os resultados de $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p , de acordo com a norma britânica, foram positivas apenas para o subgrupo dos solos argilosos formados por montmorilonitas, uma vez que nesse caso as análises estatísticas mostraram normalidade e independência dos resíduos.

Verificou-se que o banco de dados de resultados de $LL_{c-base\ macia}$ é menor em relação ao banco de dados de $LL_{c-base\ dura}$, bem como existem menos correlações publicadas na literatura. Assim, na correlação determinada para caulinitas e ilitas, cujos testes estatísticos mostraram que o modelo não é válido, verifica-se a necessidade de uma amostra mais representativa de dados para definir o modelo para esse grupo. A correlação avaliada para solos argilosos com LL_c entre 30 e 60% sem mineralogia definida, não validada em função da análise dos resíduos, apresentou comportamento diferente das publicações prévias avaliadas com $LL_{c-base\ macia}$ (Budhu, 1985; Queiroz de Carvalho, 1986; Sridharan e Prakash, 1998). No entanto, essa diferença de comportamento pode ser atribuída à diferença da mineralogia dos solos avaliados nas correlações prévias. A correlação avaliada para as montmorilonitas ($C > 30\%$), no intervalo de LL_c entre 50 e 400%, apresentou resultados satisfatórios e próximos da publicação de Sridharan e Prakash (1998), determinada com solos de mesma mineralogia, porém deve ser utilizada com cautela, em função da normalidade dos resíduos. No caso do subgrupo dos solos argilosos de diversas mineralogias com LL_c entre 60% e 400% a correlação investigada não é válida, uma vez que os testes estatísticos foram insatisfatórios para normalidade e independência dos resíduos.

Em relação à influência da mineralogia nas correlações entre $LL_{c-base\ macia}$ e LL_p , foi possível verificar que nos solos argilosos formados essencialmente por montmorilonitas $LL_{c-base\ macia}$ é maior do que LL_p em até 19% no intervalo de LL_c entre 50 e 400%. Para as caulinitas e ilitas os resultados mostraram que LL_p é maior

do que LL_c em até 10%. Além disso, ao contrário dos resultados para $LL_{c-base\ dura}$ os resultados mostraram que para solos formados essencialmente por caulinitas e ilitas as diferenças entre LL_p e LL_c serão maiores do que solos com quaisquer formações mineralógicas, para uma mesma faixa de valores de LL . No entanto, como as correlações comparadas são inválidas em função dos testes dos resíduos, essa tendência não pode ser confirmada neste estudo.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprimorar os estudos da influência da dureza da base nos resultados de LL_c e, conseqüentemente, nas correlações entre $LL_{c-base\ dura} - LL_p$ e $LL_{c-base\ macia} - LL_p$;
- Obter um maior banco de dados, especialmente com resultados de $LL_{c-base\ macia}$ para procurar definir mais modelos válidos;
- Obter um maior e mais detalhado conjunto de dados com resultados de LL_c e LL_p e correspondentes caracterizações dos solos e dos ensaios, para possibilitar a investigação da influência de outros parâmetros nas correlações, tais como: Peso específico dos grãos (G_s), método de preparação da amostra (seca ou úmida) e teor de argila (C);
- Utilizar modelos computacionais para definir correlações entre ensaios geotécnicos, tais como o uso das Redes Neurais (ANN – *Artificial Neural Network*) que, através de processos iterativos e ponderados das variáveis envolvidas, permitem o ajustamento dos modelos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 6459 – “Determinação do limite de liquidez: NBR 6459”. Rio de Janeiro, 1984.

BICALHO, K.V., GRAMELICH, J. C., CUNHA, C.L.S. “Comparação entre os valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para solos argilosos brasileiros.” Comunicações Geológicas 101, Especial III, 1097-1099, 2014.

BICALHO, K.V., GRAMELICH, J. C., CUNHA, C.L.S., JUNIOR, R.G.S. “Estudo dos valores do limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e cone para diferentes argilas”, Geotecnia 140, 63-72, 2017.

BS 1377. “Methods of Test for Soil for Civil Engineering Purposes. British Standards, Londres. British Standard Institution. 1975. Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Parte 2.” 1990.

BUDHU, M. “The effect of clay content on liquid limit from a fall cone and the British cup device”. Geotech. Test. J., 8:91-95, 1985.

BUDHU, M. “Soil Mechanics and Foundations”. 2ª edição, John Wiley & Sons, INC., USA, pp. 616, 1999.

CASAGRANDE, A. “Research on the Atterberg Limits of Soils”. Public Roads, 13:121-136, 1932.

CHRISTARAS, B. “A comparison of the Casagrande and fall cone penetrometer methods for liquid limit determination in marls from Crete, Greece”. Engineering Geology 31, 131-142, 1991.

DANTAS, S., ARAÚJO, C.B.C. “Caracterização de Solos Lateríticos para Utilização em Pavimentos de Baixo Custo na Cidade de Canindé/CE”. 2014.

DEKA, S., SREEDEEP, S., DASH, S.K. "Re-evaluation of Laboratory Cone Penetration Method for High Liquid Limit Based on Free Swell Property of Soil". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 32, No. 6, 2009.

Di MATTEO, L. "Liquid limit of low- to medium-plasticity soils: comparison between Casagrande cup and cone penetrometer test". *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 71:79-85, 2012.

DI MATTEO, L.; DRAGONI, W; CENCETTI, C RICCO, R. "Effects of Fall-Cone Test on Classification of soils: Some considerations from Study of two engineering Earthworks in Central Italy". *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 75:1629-1637 2016.

DRAGONI W., PROSPERINI, N., VINTI, G. "Some observations on the procedures for the determination of the liquid limit: an application on Plio-Pleistocenic clayey soils from Umbria region (Italy)". *Ital. J. Eng. Geol. Environ. Spec. Issue*, 1:185-197, 2008.

DUMBLETON, M.J., WEST, G. "Some factors affecting the relation between the clay minerals in soils and their plasticity". *Clay Minerals.*, 6, 179, 1966.

FARRELL, E., SCHUPPENER, B. AND WASSING, B. ETC. 5 "Fallcone study". *Ground Eng.* 30: 33-36, 1997.

FENG, T. "Using a small ring and a fall-cone to determine the plastic limit". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol. 136, No. 6, pp. 630-635, 2004.

FLORES, R.D.V., EMIDIO, G.D. "Assessment of clay consistency through conventional methods and indirect extrusion tests". *Clay Science* 101, 632–636, 2014.

FOJTOVÁ, L.; MARSCHALKO M.; FRANEKOVÁ, R. & KOVÁR, L. "Study of compatibility of methods for liquid limit measurement according to Czech State Standard and newly adopted European Standard". *GeoSci. Eng. LV*, 1:55-68, 2009.

GRIM R.E. *Applied Clay Mineralogy*, McGraw-Hill, New York, 1962.

HAIGH, S. K. "Mechanics of the Casagrande Liquid Limit Test," *Can. Geotech. J.*, Vol. 49, No. 9, pp. 1015–1023, 2012.

HAIGH, S. K., VARDANEGA, P. J., AND BOLTON, M. D. "The Plastic Limit of Clays," *Geotechnique*, Vol. 63, No. 6, pp. 435–440, 2013.

HAIGH, S. K., VARDANEGA, P. J. "The undrained strength - liquidity index relationship", 2013.

HAIGH, S.K. "Consistency of the Casagrande Liquid Limit Test", 2015.

HANSBO, S. "A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall cone test." *Swedish Geotechnical Institute Proceedings*, Vol. 14: 5-47, 1957.

HOULSBY, G. T. "Theoretical analysis of the fall cone test". *Geotechnique*, Vol. 32, No. 2, pp.111-118, 1982.

JARUSHI, F., ALKAABIM, S., COSENTINO, P. "A new correlation between SPT and CPT for various soils". *International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering*, v. 9, n.2, 2015.

KELLY, B.C.O., HAIGH, S. K., VARDANEGA, P. J. "Use of Fall Cones to Determine Atterberg Limits: A Review", 2017.

KESTLER, M. A. "Correlations and comparisons between the Casagrande liquid limit device and the fall Cone". M. S. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1982.

KOESTER, J. P. "The Influence of Test Procedure on Correlation of Atterberg Limits with Liquefaction in Fine-grained Soils," *Geotech. Test. J.*, Vol. 15, No. 4, pp. 352–361, 1992.

KUMAR, G. V. AND MUIR, WOOD D. "Fall Cone and Compression Tests on Clay-gravel Mixtures," *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, pp. 727–739, 1999.

LEE, L. T., FREEMAN, R. B. "Dual-weight fall cone method for simultaneous liquid and plastic limit determination." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental engineering*, Vol. 135, No. 1, pp. 158-161, 2009.

LEROUEIL, S. & LE BIHAN, J. P. "Liquid Limits and Fall Cones". *Can. Geotech. J.*, 33: 793-798, 1996.

MARTIN, R.T., LAMBE, T.W. *Clay Miner. Bull.*, 3, 137, 1957.

NAGARAJ, T. S., MURTHY, B. R. S. & BINDUMADHAVA, V. "Liquid limit determination further simplified". *Geotech. Test. J.* 12, No. 4, 302–307, 1987.

NAGARAJ, H. B., SRIDHARAN, A. MADHU, B. V. "Comparative study of determination of liquid limit by percussion cup, cone and K0-stress methods", 8 International Symposium on Lowland Technology, Indonesia, p. 66-74, 2012.

MISHRA, A.K., OHTSUBO, M., LI, L.Y., HIGASHI, T. "Influence of various factors on the difference in the liquid limit values determined by Casagrande's and fall cone method", 2012.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C., HUBELE, N.F. “Estatística Aplicada à Engenharia”. Segunda Edição, LTC, 2004.

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. 4ª edição, LTC, 2009.

NORMAN, L.E.J. “A comparison of values of liquid limit determined with apparatus having bases of different hardness”. *Geotechnique* 8(2):79–83, 1958.

OLSZEWSKA, B.G. “Modelling physical properties of mixtures of clays: example of a two-component mixture of kaolinite and montmorillonite”. *Clay Science* 22, 251–259, 2003.

OZER, M. “Comparison of liquid limit values determined using the hard and soft base Casagrande apparatus and the cone penetrometer”. *Bull. Eng. Geol. Environ.*, 68:289–296, 2009.

QUEIROZ DE CARVALHO, J. B. “The applicability of the cone penetrometer to determine the Liquid Limit of Lateritic soils”. *Geotechnique*, 36:1-8, 1986.

QUINTELA, A., COSTA, C., TERROSO, D., ROCHA, F. “Liquid limit determination of clayey material by Casagrande method, fall cone test and EBS parameter”, 2014.

RODRIGUES, S.C.A. “Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações”. Tese de Mestrado. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2012.

RUSSEL, E.R., MICKLE J.L. “Liquid limit values of soil moisture tensions”. *J Soil Mech Found Division ASCE* 96:967–987, 1970.

SANTOS, M. D. “Correlações entre sondagem de simples reconhecimento e resultados de ensaios de campo (SPT, CPT, DP) para diferentes subsolos arenosos”. Tese de mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

SEED, H. B., WOODWARD, R. J. & LUNDGREN, R. “Fundamental aspects of the Atterberg limits”. *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 90, No. SM6, 75–105, 1964.

SHERWOOD, P. T. AND RYLEY, M. D. “An Investigation of a Cone Penetrometer Method for the Determination of the Liquid Limit,” *Geotechnique*, Vol. 20, No. 2, pp. 203–208, 1970.

SILVEIRA, L.C.S. “O cone de penetração como ensaio alternativo na determinação da plasticidade de solos”. COBENGE, 2001.

SKOPEK, J., TER-STEPANIAN, G. "Comparison of liquid limit values determined according to Casagrande and Vasilev". *Geotechnique* 25(1):135–136, 1975.

SOUSA, P.M.L.P. "Limite de Liquidez – Correlações e comparações entre os Métodos de fall cone e da concha de Casagrande". Tese de mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2011.

SPAGNOLI, G. "Comparison between Casagrande and drop-cone methods to calculate liquid limit for pure clay". *Canadian Journal of Soil Science*, 2012.

SRIDHARAN, A. AND PRAKASH, K. "Percussion and Cone Methods of Determining the Liquid Limit of Soils: Controlling Mechanisms," *Geotech. Test J.*, Vol. 23, No. 2, pp. 236–244, 2000.

SRIDHARAN, A., Sivapullaiah, P.V. "Liquid limit of soil mixtures", 1985.

SRIDHARAN, A. & PRAKASH, K. Liquid limit and fall cone: discussion. *Can. Geotech. J.*, 35:407-408, 1998.

SRIDHARAN, A., AND NAGARAJ, H.B. "Absorption water content and liquid limit of soils". *Geotech.*, 1999.

SRIDHARAN, A. AND PRAKASH, K. "Mechanisms controlling the undrained shear strength behaviour of clays". *Can. Geotech. J.*, 1999.

TERZAGHI, K. (1926a). Simplified soil tests for subgrades and their physical significance. *Public Roads*, 7(8): 153–170.

TERZAGHI, K. (1926b). Principles of final soil classification. *Public Roads*, 8(3): 41–53.

TROTTA, A.M. E ESQUIVEL, E.R. "Comparação dos resultados de limite de liquidez obtidos pelos métodos de Casagrande e de penetração de cone", 2006.

VARDANEGA, P. J. AND HAIGH, S. K. "The Undrained Strength—Liquidity Index Relationship," *Can. Geotech. J.*, Vol. 51, No. 9, pp. 1073–1086, 2014.

WASTI, Y. "Liquid and Plastic Limits as Determined from the Fall Cone and the Casagrande Methods". *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 10, No. 1, pp. 26-30, 1987.

WASTI, Y. AND BEZIRCI, M. H. H. "Determination of the Consistency Limits of Soils by the Fall-Cone Test," *Can. Geotech. J.*, Vol. 23, No. 2, pp. 241–246, 1986.

WES. "Evaluation of Available Liquid Limit Devices," Report 3, Misc. Paper 3-478, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, S, 1961a

WES. "Determination of Liquid and Plastic Limits of Soils by the Cone Penetration Method," Report 4, Misc. Paper 3-478, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1961b.

WHITE, W.A. "Atterberg plastic limits of clay minerals". *American Mineralogist*, Vol. 34, n. 7 e 8, 1949.

WHYTE, I. L. "Soil plasticity and strength: a new approach using extrusion". *Ground Engng* 15, No. 1, 16-24, 1982.

WINSLOW, J. D. AND GATES, G. R. "Effect of Soil Rehydration on Atterberg Limits," *Mater. Res. Stand.*, Vol. 3, No. 3, pp. 205- 209, 1963.

WROTH, C. P. "Correlations of some engineering properties of soils." *Proc. 2nd International Conference on the Behaviour of Offshore Structures*, Vol. 1 pp. 121-132, 1979.

WROTH, C. P. AND WOOD, D. M. "The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils." *Canadian Geotech. J.*, Vol. 15 (2): 137-145, 1978.

YOUSSEF, M. S., EL RAMLI, A. H., AND EL DEMERY, M. "Relationships Between Shear Strength, Consolidation, Liquid Limit and Plastic Limit for Remoulded Clays," *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Canada, pp. 126-129, 1965.

ANEXO I

Tabela Anexo I.1 – Valores Críticos do Teste KS para 5% de significância.

Observações (n)	D'KS
5	0,56
10	0,41
15	0,34
20	0,29
25	0,27
30	0,24
35	0,23
40	0,21
45	0,20
50	0,19
Amostras Maiores	$1,36/\sqrt{n}$

Tabela Anexo I.2 – Valores Críticos do Teste SW para 5% de significância.

n	D' _{sw}	n	D' _{sw}	n	D' _{sw}	n	D' _{sw}	n	D' _{sw}
3	0,767	13	0,866	23	0,914	33	0,931	43	0,943
4	0,748	14	0,874	24	0,916	34	0,933	44	0,944
5	0,762	15	0,881	25	0,918	35	0,934	45	0,945
6	0,788	16	0,887	26	0,920	36	0,935	46	0,945
7	0,803	17	0,892	27	0,923	37	0,936	47	0,946
8	0,818	18	0,897	28	0,924	38	0,938	48	0,947
9	0,829	19	0,901	29	0,926	39	0,939	49	0,947
10	0,842	20	0,905	30	0,927	40	0,940	50	0,947
11	0,850	21	0,908	31	0,929	41	0,941		
12	0,859	22	0,911	32	0,930	42	0,942		

Tabela Anexo I.3 – Valores Críticos do Teste DW para 5% de significância.

n	dL	dU	n	dL	dU	n	dL	dU	n	dL	dU
6	0,610	1,400	26	1,302	1,461	70	1,583	1,641	320	1,810	1,823
7	0,700	1,356	27	1,316	1,469	75	1,598	1,652	330	1,813	1,825
8	0,763	1,332	28	1,328	1,476	80	1,611	1,662	340	1,816	1,828
9	0,824	1,320	29	1,341	1,483	85	1,624	1,671	350	1,819	1,830
10	0,879	1,320	30	1,352	1,489	90	1,635	1,678	360	1,821	1,833
11	0,927	1,324	31	1,363	1,496	95	1,645	1,687	370	1,824	1,835
12	0,971	1,331	32	1,373	1,502	100	1,654	1,694	380	1,826	1,837
13	1,101	1,340	33	1,383	1,508	150	1,720	1,747	390	1,829	1,829
14	1,045	1,350	34	1,393	1,514	200	1,758	1,779	400	1,831	1,841
15	1,077	1,361	35	1,402	1,519	210	1,764	1,786	410	1,833	1,823
16	1,106	1,371	36	1,411	1,525	220	1,770	1,788	420	1,835	1,845
17	1,133	1,381	37	1,419	1,530	230	1,775	1,793	430	1,837	1,846
18	1,158	1,391	38	1,427	1,535	240	1,780	1,797	440	1,839	1,848
19	1,180	1,401	39	1,435	1,540	250	1,785	1,801	450	1,841	1,840
20	1,201	1,411	40	1,442	1,544	260	1,789	1,804	460	1,843	1,851
21	1,221	1,420	45	1,475	1,566	270	1,793	1,808	470	1,844	1,853
22	1,239	1,429	50	1,503	1,585	280	1,797	1,811	480	1,846	1,864
23	1,257	1,437	55	1,528	1,601	290	1,801	1,814	490	1,848	1,856
24	1,273	1,446	60	1,549	1,616	300	1,804	1,817	500	1,849	1,857
25	1,288	1,454	65	1,567	1,629	310	1,807	1,820	550	1,856	1,864

APÊNDICE A

Tabela Apêndice A.1 - Rotina de Sintaxe utilizada no Programa-R

```
#Leitura dos dados
read.table("name.txt",header=TRUE) #importar tabela
name<-read.table("name.txt",header=TRUE) #salvar tabela
x<-name[,1] #atribui LLp variavel x
y<-name[,2] #atribui LLc variavel y

#Regressão Linear simples
regressao<-lm(y ~ x) #regressão linear
regressao #mostra os coeficientes de intercepto e inclinação
summary(regressao) #resultados
plot(x,y,xlab="LLp(%)",ylab="LLc(%)",main="LLp x LLc (name)") #plotagem gráfico
de dispersão
abline(regressao) #plotagem da linha de regressao no grafico de dispersao
confint(regressao) #intervalo de confiança

#Teste de Hipoteses
summary(regressao) #para verificar valores-p testes t e F

#Análise de resíduos - testes homocedasticidade
plot(y,residuals(regressao),xlab="LLc",ylab="resíduos")
abline(h=0)
plot(x,residuals(regressao),xlab="LLp",ylab="resíduos")
abline(h=0)

#Análise de resíduos - testes normalidade
qqnorm(residuals(regressao),ylab="resíduos",xlab="quantis teoricos",main="")
#plotagem de gráfico de probabilidade normal de resíduos
qqline(residuals(regressao))
hist(residuals(regressao),freq=T,xlab="resíduos",ylab="frequencia") #plotagem de
histograma
shapiro.test(residuals(regressao)) #aplicavel quando 8<=n<=30
```

```
ks.test(residuals(regressao),pnorm)
```

```
#Análise de resíduos - teste de independencia  
library(lmtest) #carregar pacote  
dwtest(regressao)
```
